
MASTERARBEIT

Herr Dipl.-Ing. (FH)
Nick Meyer

**Entwicklung und Inbetrieb-
nahme des Blindleistungsreg-
lers der „Intelligenten Lade-
säule“.**

Mittweida, 2013

MASTERARBEIT

Entwicklung und Inbetriebnahme des Blindleistungsreglers der „Intelligenten Ladesäule“.

Autor:

Herr Dipl.-Ing. (FH)

Nick Meyer

Studiengang:

Energiesystemtechnik

Seminargruppe:

ET11sE-M

Erstprüfer:

Herr Professor Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Zweitprüfer:

Herr Professor Dr.-Ing. Swen Schmeißer

Einreichung:

Mittweida, 31.03.2013

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, .2013

MASTER-THESIS

Development and commissioning of the power factor controller of "smart charging station."

author:

Mr. Dipl.-Ing. (FH)

Nick Meyer

course of studies:

Power Systems Engineering

seminar group:

ET11sE-M

first examiner:

Professor Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

second examiner:

Professor Dr.-Ing. Swen Schmeißer

submission:

Mittweida, 31.03.2013

defence/ evaluation:

Mittweida, 2013

Bibliografische Beschreibung:

Meyer, Nick:

Entwicklung und Inbetriebnahme des Blindleistungsreglers der „Intelligenten Ladesäule“. - 2013. - 10, 86, 53 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Masterarbeit, 2013

Referat:

Für ein vorhandenes elektrotechnisches System ist eine Regelung zu entwickeln und zu implementieren. In dieser Arbeit wird die Vorgehensweise von der Systemanalyse bis zur Implementierung des Reglers sowie dessen Test und Verifizierung beschrieben. Dazu ist zunächst eine Analyse des zu regelnden Systems durchzuführen, was anhand der Ausmessung verschiedener Komponenten geschehen soll. Aus den gewonnenen Messdaten leitet man anschließend die mathematischen Formeln für die Regelstrecke her. Das zu regelnde System wird mittels des Bode-Stabilitätskriteriums untersucht und die Reglerverstärkungen mit dem symmetrischen Optimum ermittelt. Darauf aufbauend muss das System im Computer durch eine Simulationssoftware eine Nachbildung finden und mit den zuvor berechneten Regelparameter auf Funktion und Richtigkeit überprüft werden. Der Regler ist dann in Software auszuführen. Aus dem Simulationsmodell wird eine Umsetzung der mathematischen Berechnungen in einen digitalen Signalprozessor mit der Programmiersprache C implementiert. Die Regelung wird anschließend erfolgreich am realen System getestet und mit den Simulationsergebnissen verglichen. Für Abweichungen der Messergebnisse zur Simulation sind mögliche Fehlerquellen benannt.

Inhalt

Inhalt I

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Formelverzeichnis.....	IX
Einleitung.....	1
1 Grundlagen und Stand der Technik	7
1.1 Aufbau eines Dreiphasenwechselstromsystems.....	8
1.2 Clarke-Transformation.....	9
1.3 Park-Transformation	11
1.4 Regelungstechnik.....	13
1.4.1 Entwurf einer digitalen Regelung.....	14
1.4.1.1 Das Shannon'sche Abtasttheorem	15
1.4.1.2 Abtastung nach Quang für Strommesswerte.....	15
1.4.1.3 Messwerterfassung mit Amplituden-Abtastung.....	17
1.4.1.4 Der Regelalgorithmus eines PI-Reglers	18
1.4.2 Regelstrecke.....	18
1.4.2.1 Grundprinzip der Einspeisung.....	18
1.4.2.2 Stellglied	19
1.4.2.3 Regelstrecke.....	19
1.4.2.4 Messglied	19
1.4.3 Entwurfsverfahren	19
1.4.3.1 Stabilitätskriterium nach Bode	19
1.5 Reglerentwurf und -optimierung.....	20
1.5.1 Betragsoptimum	20
1.5.2 Symmetrisches Optimum	20
2 Entwurf des PI-Reglers	23
2.1 Ermittlung der Parameter des Stelltransformators.....	23
2.2 Reduzieren des Transformatorersatzschaltbildes.....	24
2.3 Aufstellen der Systemgleichungen	25

2.4	<i>PI-Regelung.....</i>	28
2.4.1	Stabilität nach Bode.....	29
2.4.2	Betragsoptimum.....	29
2.5	<i>Zusammenfassung zum Reglerentwurf.....</i>	30
3	Simulationen.....	31
3.1	<i>Ermittlung des Drehwinkels vom Energienetzes.....</i>	32
3.2	<i>Simulation des Zuschaltens ans Netz ohne Regelung bei 0A.....</i>	33
3.3	<i>Simulation des Zuschaltens an das Netz mit PI-Regler bei einem Sollwert von 0 A</i>	35
3.3.1	Regler Sprungantwort am Beispiel von I_d	36
3.3.2	Einspeisen von auf die Grundfrequenz aufmodulierten Oberwellen	36
3.4	<i>Inbetriebnahme Algorithmus</i>	37
3.4.1	Überprüfung des Übersetzungsverhältnisses am Trafo.....	38
3.4.2	Verkabelungsüberprüfung und Messgerätetest.....	38
3.4.2.1	Wechselrichterverdrahtung und Messwerterfassung fehlerfrei	39
3.4.2.2	Anschluss mit zwei verpolten Phasen	41
3.4.2.3	Anschluss mit drei verpolten Phasen	42
3.4.2.4	Zwei vertauschte Strommessgeräte	43
3.4.2.5	Drei vertauschte Strommessgeräte	44
3.5	<i>Zusammenfassung</i>	45
4	Umsetzung in C.....	47
4.1	<i>Überblick des Gesamtsystems</i>	47
4.2	<i>DSP</i>	48
4.2.1	Überblick der Integer-Variablenbereiche im DSP	48
4.2.2	Grundfunktionen arithmetik.c	50
4.2.2.1	fxpunktkonversion()	50
4.2.2.2	mul16()	51
4.2.2.3	divi16()	51
4.2.2.4	zweierkomplement32()	51
4.3	<i>Hauptfunktionsbausteine</i>	51
4.3.1	Funktionsbaustein clarktransformation.c.....	52
4.3.2	Funktionsbaustein parktransformation.c	52
4.3.3	Funktionsbaustein PID_Regler.c	53
4.3.4	Funktionsbaustein inbetriebnahme.c	54
4.3.5	Funktionsbaustein normierung.c	56
4.3.6	Sonstige Funktionen	57
4.3.6.1	Bibliothek „trigo.c„.....	58
4.4	<i>Zusammenfassung</i>	59

5	Versuchsaufbau und Messergebnisse	61
5.1	<i>Aufbau ohne Netzankopplung</i>	<i>61</i>
5.2	<i>Aufbau mit Netzankopplung.....</i>	<i>63</i>
5.2.1	Ohne Regelung über die Widerstände.....	63
5.2.1.1	Keine Phasenverpolung	64
5.2.1.2	Zwei verpolte Phasen	66
5.2.1.3	Drei verpolte Phasen	67
5.2.2	Mit Regelung	68
5.2.2.1	Ermittlung der Regelstrecke	69
5.2.2.2	Simulation mit neuen Reglereinstellungen	70
5.2.2.3	Ausregelung über Widerstände auf 0A	71
5.2.2.4	Ausregelung Wechselrichter - Netz auf 0 A.....	73
5.2.2.5	Sprungantwort auf 3 A am Beispiel von Id	74
5.2.3	Mögliche Störgrößeneinkopplungen	75
5.2.3.1	Oberwellen des Zwischenkreises	75
5.2.3.2	Störungen in der Netzspannung	77
5.2.3.3	Störungen bei der Stromistwerterfassung.....	77
5.2.3.4	Störungen durch Gegensysteme auf den Park-Transformierten des Stromes .	78
5.3	<i>Auswertung und Zusammenfassung</i>	<i>79</i>
6	Zusammenfassung und Ausblick	81
7	Literatur	85
8	Anhang	87
	Anlagen, Teil 2 Quellcode	114
	Selbstständigkeitserklärung	139

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Verlauf einer Dreiphasenwechselspannung über einen Winkel von 360° .	8
Abbildung 1-2: Spannungszeiger eines Dreiphasensystems bei $0,5 \text{ rad}$	8
Abbildung 1-3: Raumzeiger aus geometrischer Addition der Spannungszeiger U, V und W bei $0,5 \text{ rad}$	9
Abbildung 1-4: Raumzeiger nach vollständiger Clarke-Transformation für Φ von $0,5 \text{ rad}$	10
Abbildung 1-5: Parkzeiger der Ströme aus den Leitern U, V und W verknüpft mit dem Drehwinkel der Spannung	12
Abbildung 1-6 digitaler Regelkreis mit allen wesentlichen Elementen im Blockschaltbild nach [Jörg1994] S. 80	14
Abbildung 1-7 Augenblickswertmessung mittels A/D-Wandler nach [Quan1993] S. 115 Bild 4.1	16
Abbildung 1-8 Messwertverfassung des VFC-Verfahrens nach Quang [Quan1993] S. 117	17
Abbildung 1-9 Einspeiseprinzip des Wechselrichters in das Energienetz.....	18
Abbildung 2-10 Ersatzschaltbild des Transformators in <i>Portunus</i>	23
Abbildung 2-11 Labortischtransformatornachbildung in <i>Portunus</i> aus drei Trafos	24
Abbildung 2-12 Transformatorersatzschaltbild bezogen auf die Spannungsebene des Wechselrichters	25
Abbildung 2-13 Vereinfachtes Transformatorersatzschaltbild bezogen auf die Spannungsebene des Wechselrichters.....	25
Abbildung 2-14 Übertragungsstrecke der Strommessapparatur	27

Abbildung 2-15 analoger Regelkreis mit PI-Regler des Testaufbaus Wechselrichter Transformator	28
Abbildung 2-16 analoge Regelstrecke	29
Abbildung 3-17 idealer Hardwareaufbau für die simulative Beschreibung des Wechselrichtermodells in <i>Portunus</i>	31
Abbildung 3-18 Drehwinkel des Netzspannungsraumzeiger bei Sternpunktverlagerung; unvollständige und vollständige Transformation	32
Abbildung 3-19 nicht linearer und linearer Verlauf des Drehwinkels.....	33
Abbildung 3-20 Ströme beim Einschaltvorgang des Wechselrichters	34
Abbildung 3-21 Ströme der drei Stränge bei symmetrischen Transformator	34
Abbildung 3-22 Ströme der drei Stränge bei unsymmetrischen Transformator mit -1% bis 1% Abweichung von der Phasen V und W	35
Abbildung 3-23 Ströme der drei Stränge bei symmetrischen Transformator mit eingeschalteter Regelung	35
Abbildung 3-24 Ströme der drei Stränge bei unsymmetrischen Transformator mit -1% bis 1% Abweichung von der Phasen V und W mit eingeschalteter Regelung	35
Abbildung 3-25 Sprungantwort des PI-Reglers für I_d	36
Abbildung 3-26 Stromverlauf in drei Phasen vor und nach der Sprungantwort.....	36
Abbildung 3-27 Grundschiwingung des Stromes einer Phase mit auf modulierter Oberwelle	37
Abbildung 3-28 Voltmeterumschaltung zur Ermittlung der Transformatorübersetzung	38
Abbildung 3-29 Anschlussübersicht des Wechselrichters zwischen Testbetrieb und Wechselrichterbetrieb	39
Abbildung 3-30 Schaltung für Verkabelungstest mit richtiger Verdrahtung	40
Abbildung 3-31 Ströme bei phasengleicher Einspeisung	40

Abbildung 3-32 Drehwinkel von Strom und Spannung bei Phasengleichheit.....	40
Abbildung 3-33 Schaltung mit zwei vertauschten Phasen	41
Abbildung 3-34 Ströme bei zwei vertauschten Phasen U und V ab 20 ms	41
Abbildung 3-35 Drehwinkel von Strom und Spannung bei zwei vertauschten Phasen ab 20ms	41
Abbildung 3-36 Schaltung mit drei vertauschten Phasen.....	42
Abbildung 3-37 Ströme bei drei vertauschten Phasen ab 20ms.....	42
Abbildung 3-38 Drehwinkel von Strom und Spannung bei drei vertauschten Phasen ab 20ms	43
Abbildung 3-39 Schaltung mit zwei vertauschten Strommessgeräten	43
Abbildung 3-40 Ströme bei Vertauschung von zwei Strommessgeräten	43
Abbildung 3-41 Drehwinkel von Strom und Spannung mit zwei vertauschten Strommessgeräten	44
Abbildung 3-42 Schaltung mit drei vertauschten Strommessgeräten	44
Abbildung 3-43 Ströme wenn drei Strommessgeräte vertauscht sind	45
Abbildung 3-44 Drehwinkel von Strom und Spannung mit drei vertauschten Strommessgeräten	45
Abbildung 4-45 Übersichtsbild der Softwaremodule des Wechselrichters	47
Abbildung 5-46 Ströme der Asynchronmaschine am Wechselrichter.....	61
Abbildung 5-47 Alpha, Beta und Theta der Netzspannung berechnet vom DSP	62
Abbildung 5-48 Leerlaufströme U, V und W des Transformators.....	63
Abbildung 5-49 Alpha, Beta und Theta der Leerlaufströme des Transformators	64
Abbildung 5-50 Ströme der drei Phasen bei Einspeisung über Widerstände nach 3.4.2.1	65

Abbildung 5-51 Alpha, Beta und Theta des Stromes bei phasenrichtiger Einspeisung	65
Abbildung 5-52 Ströme der drei Phasen bei zwei vertauschten Phasen	66
Abbildung 5-53 Alpha, Beta und Theta des Stromes bei zwei Phasen vertauscht	67
Abbildung 5-54 Ströme der drei Phasen bei drei vertauschten Phasen	68
Abbildung 5-55 Alpha, Beta und Theta des Stromes bei drei Phasen vertauscht	68
Abbildung 5-56 Reglersprungantwort mit neuen Systemparametern auf 3 A	70
Abbildung 5-57 Simulierte Ströme der drei Phasen mit neuen Streckenwerten	70
Abbildung 5-58 Zoom in den ersten Quadranten eines Leiterstromes	71
Abbildung 5-59 Ausregelung Wechselrichter – Netz auf 0 A	71
Abbildung 5-60 ausgeregelte Ströme der drei Stränge bei einem Sollwert von 0 A	72
Abbildung 5-61 Ausgeregelte Ströme bei einem Sollwert von 1000	72
Abbildung 5-62 Ausregelung auf 0 A mit Umschaltung von Widerstand (150 mA) auf Netz (300 mA) – U (gelb) und I (grün) einer Phase	73
Abbildung 5-63 Id-soll und Id-ist von einem Sollwertsprung auf 3 A	74
Abbildung 5-64 Ausregelung des Stromes gegenübergestellt zur Netzspannung mit Führungsgröße und Istgröße	75
Abbildung 5-65 Oberwellenbehaftete Zwischenkreisspannung des Wechselrichters	76
Abbildung 5-66 Ausgangsstrom des Wechselrichters bei Normierung mit aktueller Zwischenkreisspannung	76
Abbildung 5-67 gemittelte Zwischenkreisspannung des Wechselrichters	76
Abbildung 5-68 Ausgangsstrom des Wechselrichters bei Normierung mit gemittelter Zwischenkreisspannung	77
Abbildung 5-69 Parktransformation mit und ohne Gegensystem von $3 \cdot f_0$	78

Abbildung 5-70 Übersichtsbild der Softwaremodule des Wechselrichters mit Ansatzpunkten für Verbesserungen der Hard und Software.....	80
--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Inbetriebnahmealgorithmus des Wechselrichters	37
Tabelle 2 Eingangsdaten vom A/D-Wandler	48
Tabelle 3 Korrekturfaktoren für die gewandelten Werte.....	49
Tabelle 4 Zahlenformate der gewandelten Werte	50
Tabelle 5 Reglerauswahlmöglichkeiten des PID-Reglerprogramms.....	54

Abkürzungsverzeichnis

DSP	Digitaler Signalprozessor
RZM	Raumzeigermodulation

Formelverzeichnis

$e(t)$	– Regelabweichung
f_g	– Grenzfrequenz eines Systems
f_{\max}	– maximale Frequenz
$G(s)$	– allgemeine Übertragungstrecke im Laplace-Bereich
$G_{\text{Mess}}(s)$	– Übertragungsfunktion des Messgliedes im Laplace-Bereich
$G_{\text{PI}}(s)$	– Übertragungsfunktion des PI-Reglers im Laplace-Bereich
$G_R(s)$	– Übertragungsfunktion Regler Laplace-Bereich
$G_s(s)$	– Übertragungsfunktion Strecke / System im Laplace-Bereich
$G_{\text{Trafo}}(s)$	– Übertragungstrecke des Stelltransformators im Laplace-Bereich
$G_{\text{WR}}(s)$	– Übertragungsfunktion des Wechselrichters im Laplace-Bereich
$i(s)$	– Strom im Laplace-Bereich
i_0	– Nullkomponente der Clarke Transformierten / Park Transformierten
i_d	– Park-Transformierter "d" Anteil des Stromes
i_q	– Park-Transformierter "q" Anteil des Stromes
\hat{i}_s	– gefilterter Strom nach Quang
i_α	– Clarke Transformierte des Stromes (Realteil)
i_β	– Clarke Transformierte des Stromes (Imaginärteil)
i_γ	– Nullkomponente der Clarke Transformierten / Park Transformierten
k	– Anzahl von Schritten im diskreten bereich
K_i	– Integralverstärkung
K_p	– Proportionalverstärkung
K_R	– Reglerverstärkung
L	– Induktivität allgemein
L_s	– Streuinduktivität Transformator / Regelstrecke
L_{Trafo}	– L_s
$L_{\text{Trenntrafo}}$	– Ersatzinduktivität des Trenntransformators
m	– Anzahl der verwendeten Bits hinter der Kommastelle im Qn.m Zahlenformat
n	– Anzahl der verwendeten Bits vor der Kommastelle im Qn.m Zahlenformat
R	– Widerstand allgemein
R_{cu}	– Kupferwiderstand Trafo / Regelstrecke
R_{Trafo}	– R_{cu}
$R_{\text{Trenntrafo}}$	– Ersatzwicklungswiderstand des Trenntransformators

s	– Variable im Laplace-Bereich
T	– Periodendauer
T_1	– allgemeine Zeitkonstante / Zeitkonstante des Stelltransformators
T_2	– allgemeine Zeitkonstante / Zeitkonstante des Wechselrichters
T_g	– $1 / f_g$
T_l	– Periodendauer für den linken Zeiger eines Sektors der RZM
T_N	– Nachstellzeit des I-Reglers
T_r	– Reglerzeitkonstante
T_r	– Periodendauer für den rechten Zeiger eines Sektors der RZM
$T_{\text{Wechsel_Grenz}}$	– $1 / (\text{Grenzfrequenz des Wechselrichters})$
\ddot{u}	– Übersetzungsverhältnis des Stelltransformators
$U(s)$	– Eingangssignal im Laplace-Bereich
U_0	– Nullkomponente der Clarke Transformierten / Park Transformierten
$u_u(t), u_v(t), u_w(t)$	– Zeitliche Spannungen der drei Phasen eines Drehstromnetzes
$u_u(\theta), u_v(\theta), u_w(\theta)$	– Winkelbezogene Spannungen der drei Phasen eines Drehstromnetzes
$U_{\text{Wechselrichter}}$	– RMS Ausgangsspannung des Wechselrichters
U_α	– Clarke Transformierte der Netzspannung (Realteil)
U_β	– Clarke Transformierte der Netzspannung (Imaginärteil)
U_γ	– Nullkomponente der Clarke Transformierten / Park Transformierten
$Y(s)$	– Ausgangswert der Übertragungsfunktion im Laplace-Bereich
$y(t)$	– Stellgröße
ΔU_R	– RMS Spannungsdifferenz Wechselrichter — Transformator
θ_i	– Winkel des Raumzeigers des Stromes
θ_u	– Winkel des Raumzeigers der Spannung
ω_0	– Kreisfrequenz von 0
ω_{max}	– maximale Kreisfrequenz

Einleitung

Das Energieversorgungsnetz der Bundesrepublik Deutschland besteht aus einer Vielzahl von Erzeugern und Verbrauchern. Wechselrichter erfüllen für gewöhnlich die Funktion eines Erzeugers und es gibt sie in den unterschiedlichsten Ausführungen. Diese Wechselrichter sind als fertige Systeme auf dem Markt erhältlich. Dabei ist ihre Arbeitsweise unter Umständen unbekannt oder aber der Anwender kann die Geräte nur parametrieren und nicht in der Funktionsweise beeinflussen. Ein Testaufbau mit einer freien, individuell einstellbaren und wählbaren Arbeitsweise wäre eine Spezialanfertigung aus der Industrie, deren Erwerb die nötigen, nicht unerheblichen finanziellen Mittel erfordert. Allerdings lassen sich die Bauteile und Module im Einzelnen zu wesentlich geringeren Kosten auf dem Markt erwerben. Die Hochschule Mittweida hat einen solchen Weg eingeschlagen, indem sie es sich zur Aufgabe gemacht hat, diese einzelnen Komponenten und Module zu einem Gesamtsystem zusammenzufügen. Mit diesem Vorgehen strebt die Hochschule nach einem frei programmierbaren und konfigurierbaren Wechselrichter in Soft- und Hardware, was dem Hochschulstandort Mittweida gegenüber anderen Hochschulen einen entscheidenden Vorteil in Ausbildung und Forschung im Bereich der Energietechnik verschaffen soll. Die somit erhaltene Hardware soll für Ausbildungszwecke und weitere Forschung im Bereich der Netzeinspeisung sowie des Verbrauchs von Leistung aus dem Netz und der Steuerung und Regelung von Drehstrommotoren eingesetzt werden.

Wechselrichter sind heutzutage bereits großflächig im Einsatz. Im Netzbetrieb nutzt man sie derzeit für das Einspeisen elektrischer Energie. Praktische Anwendungen sind zum Beispiel das Einspeisen erzeugter Leistungen aus Photovoltaik- oder aus Windkraftanlagen. Diese Wechselrichter können zum aktuellen Zeitpunkt schon viele Aufgaben zur Verbesserung der Netzqualität übernehmen. Sie können beim Einspeisen geregelt Blindleistung sowie Wirkleistung in gewünschten Größen bereitstellen. Auch das Kompensieren von Oberwellen ist damit möglich. Diese Eigenschaften tragen mit dazu bei, dass solche Anlagen als aktive Filter Verwendung finden. Der Testaufbau soll beim Verstehen der verschiedenen, in der Praxis angewandten Technologien und Verfahren behilflich sein und der Erarbeitung neuer Lösungswege von beim Betrieb auftretenden Problemen dienen. Dazu ist es unerlässlich, ein vollständig offenes und frei konfigurierbares System zu haben. Den Studierenden in den Fachbereichen der Energietechnik wird ein neues System im Labor zur Verfügung gestellt, an dem sich Interessierte weiterbilden können.

Wechselrichter könnten zukünftig eine wichtigere Rolle in der Energieversorgung einnehmen. Die Bundesregierung hat einen Entwicklungsplan¹ aufgestellt, in dem sie vorsieht, bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf den Straßen der Bundesrepublik im Fahrbetrieb zu haben. Sollte dieser Plan umgesetzt werden, so stellen sich für die Netzbetreiber eine Vielzahl von Problemen ein. Dazu gehören zunächst die Kapazitäten der maximal mögli-

¹ [Bmbf2009] „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung“

chen zu transportierenden Leistungen. In enger Zusammenarbeit mit Energienetzbetreibern soll zukünftig ein Energiemanagement für das Laden und Entladen von Elektroautos entstehen. Simulative Untersuchungen über die Auswirkungen von Leistungselektronik auf die Energienetze in Verbindung mit Elektrofahrzeugen führt die Hochschule Mittweida bereits durch. Parallel zum Aufbau der Leistungselektronik entwickelt sie auch schon eine Kommunikationsschnittstelle zwischen der Erfassung der elektrischen Istwerte aus dem Steuergerät der Leistungselektronik und einem Protokollwandlermodul, mit dem die Daten aus dem digitalen Signalprozessor des Wechselrichters an ein übergeordnetes System für das später zu entwickelnde Energiemanagement übertragen werden können. Zur Zeit gibt es für Geräte in einem SMART-Grid noch keine einheitlichen Kommunikationsprotokolle, beziehungsweise gibt es für das Ansprechen von Wechselrichtern kleinerer Anlagen im Moment noch kein Konzept. Größere Anlagen von mehr als 30 kWp müssen bereits mit dem Energieversorger kommunizieren können.² Die Wechselrichter der kleineren Leistungsklassen unterliegen lediglich gewissen Normen. Die VDE-Anwendungsregel „Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz“³ sieht zum Beispiel einen Phasenschieberbetrieb für Anlagen der Leistungsklasse von 3,68 kVA bis 13,8 kVA vor. Seit dem 1. Januar 2012 ist es für neue Anlagen vorgeschrieben, einen Leistungsfaktor von 0,95 induktiv und kapazitiv anpassen zu können. Viele solcher Wechselrichter von kleineren Leistungen könnten später zu dezentralen virtuellen Kraftwerken zusammengefasst werden und auch so koordiniert geregelt und gesteuert werden. Ein Energiemanagement muss zwingend erarbeitet werden, denn zur Zeit sind Wechselrichter von Solaranlagen kleinerer Leistung so eingestellt, dass sie ihre Leistung bei einer Netzfrequenz von 50,2 Hz auf 0 W herunterregeln. Sind durch die Zunahme von Elektroautos größere Leistungskapazitäten installiert und es kommt zu einem Überschreiten der Höchstfrequenz wird dies dazu führen, dass eine Großzahl der installierten Leistung wegfällt. Das wird unausweichlich zu einem Zusammenbrechen der Stromversorgung in teilen der Bundesrepublik führen. Darum ist es unter anderem zur Zeit nicht möglich Wechselrichter in größerem Umfang für das Rückspeisen elektrischer Energie aus den Akkumulatoren von Elektroautos einzusetzen.

Ein weiteres Problem stellt damit die Netzqualität dar. Die Einstellung des Leistungsfaktors ist ein Bestandteil der Netzqualität. Daneben erzeugen technische Geräte mit Halbleitertechnologie Oberwellen in den Strömen und somit auch in der Netzspannung. Käufliche Wechselrichter halten sich an die Grenzen der festgelegten⁴ maximalen Oberwellenanteile der eingespeisten Ströme. Aktive Filter sind darüber hinaus noch in der Lage, gezielt Oberwellen einzuspeisen. Somit können bestimmte Oberwellen verstärkt oder vermindert werden. Die „Intelligente Ladesäule“ soll später all diese Funktionen zur Verbesserung der Netzqualität enthalten und selbstständig diese an die Erfordernisse anpassen. Die übergeordnete Ebene kann zusätzliche Forderungen stellen. Das Endergebnis der Anstrengungen soll ein technisches Gerät sein, welches in ein SMART-Grid und in ein virtuelles dezentrales Kraftwerk implementiert werden kann. Die Ladesäule soll dabei aktiv zur Netzqualität

² §6 (2) der EEG-Novelle 2012

³ VDE-AR-N-4105

⁴ EN-60555-210

und Versorgungssicherheit beitragen können. Dies gilt für die Fälle des Leistungsbezuges sowie der Leistungsabgabe.

Aus den zuvor genannten Gründen ergibt sich nun Folgende Aufgabenstellung. Die Hochschule Mittweida ist im Besitz eines vollständigen Hardwareaufbaus von einem 6-Pulsigem Wechselrichter mit dem Namen „Intelligenten Ladesäule“. Sie arbeitet mit dem Verfahren der Raumzeigermodulation. Für die Anwendung dieses Verfahrens ist es notwendig, sich in die Besonderheiten der feldorientierten Regelung einzuarbeiten. Auf Besonderheiten der Leistungselektronik und deren Ansteuerung wird nicht weiter eingegangen, da sie von der Raumzeigermodulation und deren Vektorerzeugung berücksichtigt werden müssen und nicht Bestandteil dieser Arbeit sind. Für den Anschluss des Wechselrichters an das Energienetz im Labor für elektrische Maschinen und Antriebstechnik der Hochschule Mittweida sind im Vorfeld mit dem Simulationsprogramm *Portunus* Erkenntnisse zu gewinnen. Demzufolge muss das System im Labor zunächst einmal messtechnisch bestimmt werden. Mit den Ergebnissen wird dann der Wechselrichter in Simulation an das Netz angeschlossen. Er soll ungeregelt so eingestellt werden, dass sich ein Ausgleichsstrom zwischen Netz und Wechselrichter von 0 A einstellt. Das erfordert eine absolut netzsynchrone Einspeisung. Parallel dazu ist eine Überwachungs- und Schutzfunktion zu entwickeln, um den Wechselrichter vor Zerstörung zu schützen. Dabei ist besonders auf die Zwischenkreisspannung und die Freilaufdioden am Leistungsteil des Wechselrichters einzugehen. Es ist also eine Schutzbeschaltung zu entwerfen, um die Freilaufdioden und auch Transistoren am Wechselrichterausgang zu schützen. Die Auswertung der Messdaten vom A/D-Wandler muss in einer Überwachungsfunktion erfolgen und der Wechselrichter gegebenenfalls abgeschaltet werden. Das Simulationsmodell wird anschließend so erweitert, dass eine vollständige Regelung von Wirk- und Blindleistungsabgabe sowie -aufnahme vorgenommen werden kann. Alle Programme für den DSP sind in der Programmiersprache C mit modularem Aufbau zu realisieren. Das Zahlenformat soll dabei Integer sein. Zuletzt soll der Wechselrichter am Netz in Betrieb genommen werden.

Der derzeitige Forschungsstand im Bereich von leistungselektronischen Netzeinspeisern ist weiter vorangeschritten als der in dieser Arbeit abgehandelte Teil. Hier sollen die Grundfunktionen implementiert werden, um in späteren Arbeiten den Forschungsstand sinnvoll ergänzend zu erweitern. Während Wechselrichter überwiegend für die Einspeisung von Strömen mit Netzparametern genutzt werden, ohne häufig dabei gezielt auf die Netzqualität einzugehen, mit Ausnahme der vorgeschriebenen Blindleistungseinstellung sowie den einzuhaltenden Klirrfaktor, setzt überwiegend die Industrie aktive Netzfilter zur Verbesserung der Netzqualität ein. Deren Motivation besteht nicht zuletzt aus einem gewissen Anteil aus Eigennutz. Ein industrieller Abnehmer muss dafür Sorge tragen, dass seine Verbrauchsanlage keine allzu großen Störungen in das Energienetz übertragen. Trägt er diese nicht, so kann es entweder dazu führen, dass der Netzbetreiber ihm einen weiteren Betrieb seiner Anlagen untersagt oder das Nichteinhalten der vorgeschriebenen Parameter durch finanzielle Ausgleichszahlungen an den Energienetzbetreiber weiterhin toleriert wird. Aktive Netzfilter unterscheiden sich vom grundlegenden Aufbau in der Hardware zum Wechselrichter unwesentlich bis überhaupt nicht. Auch im Anschluss an das Energie-

netz sind keine Unterschiede auszumachen. Das hauptsächliche Unterscheidungsmerkmal zwischen Wechselrichter und aktivem Netzfilter liegt demzufolge in ihrer Funktionalität. Während Wechselrichter lediglich zum Einspeisen von Energie in das Versorgungsnetz genutzt werden, wird mit aktiven Filtern der Störungsanteil kompensiert. Es wird demzufolge nur die Leistung in das Netz zurückgegeben, die benötigt wird um die Störungen zu kompensieren. Aktive Netzfilter kompensieren heutzutage Oberwellen, Blindleistung, Unsymmetrien auf den drei Phasen sowie Flicker-Störungen. Die Hochschule Mittweida möchte durch ihre Forschungen einen Wechselrichter erhalten, der einerseits so wie heutige Wechselrichter für beispielsweise Solaranlagen in das Netz einspeisen kann und dabei aktiv zur Verbesserung der Netzqualität beiträgt. Beim Einspeisen oder Beziehen von Leistung aus dem Netz müssen in späteren Forschungen und wissenschaftlichen Arbeiten die Besonderheiten der Energiespeicher von Elektroautos Berücksichtigung finden. Auch die Integration in ein SMART-Grid ist für das Endergebnis besonders wichtig. Diese Arbeit soll dazu beitragen, dem angestrebten Ziel der Hochschule Mittweida näher zu kommen.

Ein Prototypenaufbau, bestehend aus allen benötigten Komponenten, ist bereits vorhanden. Das vorgegebene Verfahren zum Erzeugen der Dreiphasenwechselspannung nennt sich Raumzeigermodulation. Eine Stromregelung ist anhand des vorgegebenen Verfahrens zu implementieren. In Kapitel 1 werden für das vorgegebene Verfahren zunächst die Grundlagen erläutert. Als Ausgangspunkt der zu implementierenden Regelung wird das Verfahren der feldorientierten Regelung als Vorlage genommen und so abgewandelt, dass es für den Betrieb eines Wechselrichters genutzt werden kann. Im Weiteren wird auf die Messwerterfassung sowie die Regelstrecke und den Entwurf einer stabilen Regelung eingegangen. Das 2. Kapitel stellt im Anschluss eine Analyse des Gesamtsystems auf. Die Regelstrecke wird hier vollständig mathematisch beschrieben. Danach werden die Entwurfsverfahren für eine Regelung aus dem vorhergehenden Kapitel angewandt und eine stabile Regelung hergeleitet. Die so gewonnenen Erkenntnisse müssen nun im Kapitel 3 durch Simulationen auf ihre Richtigkeit überprüft werden. Dabei muss zunächst abgeklärt werden, ob eine Messwerterfassung, so wie sie bei der feldorientierten Regelung vorgenommen wird, ausreichend ist oder ob man im Wechselrichterbetrieb auf zusätzliche physikalische Gegebenheiten Rücksicht nehmen muss. Das Simulationsmodell der raumzeigermodulierten Erzeugung von Sinusgrößen für den Inselbetrieb muss so abgeändert werden, dass eine Netzankopplung ohne einen nennenswerten Stromfluss möglich ist. In das Modell einzuarbeiten sind die in Kapitel 2 ermittelten Werte des vorgefundenen Gesamtsystems bestehend aus den Komponenten Transformator, Wechselrichter und Messgeräte. Durch die vorgeschriebene Taktung mit der Pulsfrequenz von 10 kHz kann theoretisch und praktisch der Stromfluss nicht auf 0 A gebracht werden. Als nächstes wird der Regler modelliert und für die Fälle 0 A und der Sprungantwort auf 5 A auf seine Funktion überprüft. Da der Wechselrichter ein Prototypenaufbau sein wird ist es wichtig Sicherheitsalgorithmen zu implementieren. Der Prototyp soll in der Lage sein selbstständig überprüfen zu können, ob alle extern anzuschließenden Geräte korrekt mit der DSP verbunden sind. Es wird eine Variante vorgestellt werden, wie dies umzusetzen ist. Die Besonderheiten der Integerprogrammierung werden im Vorfeld des Kapitels 4 angesprochen. Anschließend wird die Umsetzung der in Kapitel 1 bis 3 erarbeiteten Lösungen in der Programmierspra-

che C beschrieben. Allerdings wird hier nur die Funktionsweise erläutert, Details sind immer dem Quelltext aus dem Anhang zu entnehmen. Schließlich wird im 5. Kapitel zunächst im Inselbetrieb überprüft, ob eine Kopie des Netzes erzeugt wird. Der entworfene Selbstdiagnosealgorithmus aus der Simulation wird auf seine Richtigkeit überprüft. Bei bestandenem Test kann einer Zerstörung des Testaufbaus oder Teile davon durch eine falsche Verschaltung verhindert werden. Abschließend wird der entworfene Regler aus der Theorie in der Praxis getestet, womit die vorliegende Arbeit auch ihren Abschluss findet.

1 Grundlagen und Stand der Technik

Wechselrichter setzen Energieversorger sowie private und geschäftliche Energieabnehmer vermehrt zur Einspeisung in das Energieversorgungsnetz ein. Dabei kommt es unter anderem zur Verschlechterungen der Netzqualität und zu höheren Belastungen durch entstehende Oberwellen. Gegenmaßnahmen sind Wechselrichtervarianten aus einer 12-Puls-Einspeisung mit Neutralleitermodulation. Zur Eliminierung der Oberwellen setzt man unter anderem Saugkreise ein. Wechselrichter könne aber auch als aktive Filter Oberwellen kompensieren und sind schon im praktischen Einsatz mit dem Vorteil, das Oberwellen nicht mehr in Wärme umgewandelt werden müssen. Wechselstrom aus einem Wechselrichter lässt sich mit einer Vielzahl von Verfahren wie, Pulsweitenmodulation, Zweipunktregelung, Unterschwingungsverfahren, Sinus-Dreieck Modulation, Sinus-Dreieck PWM mit Zwischenpulsverschiebung, Rechteck-Dreieck Modulation, optimierte Pulsmustererzeugung oder Rechteck-Dreieck PWM erzeugen, unter anderem auch die Raumzeigermodulation. Einige dieser Verfahren lassen sich nutzen um gezielt Harmonische zu injizieren. Beim Verfahren der Raumzeigermodulation kann eine Übermodulation vorgenommen werden.

Sollte die Zahl der in Deutschland vorhandenen Elektroautos ansteigen und die Bemühungen der Netzbetreiber für eine intelligente Bereitstellung und Nutzung von Energie voranschreiten, so ist es denkbar, dass Energie aus den Kraftfahrzeugen zurück in das Energienetz eingespeist wird, oder das die Fahrzeuge vom Energienetz geladen werden. In beide Energietransportrichtungen soll es möglich sein zur Netzqualität beizutragen. Ein Wechselrichter mittels Raumzeigermodulation ist vom verwendeten Verfahren in der Lage das zu leisten. Aber das Verfahren der Raumzeigermodulation benötigt im Vorfeld eine Umsetzung von mathematischen Berechnungen um die benötigten Eingangswerte des Modulationsverfahrens generieren zu können. Außerdem muss eine Stromregelung vorhanden sein. Zur Umsetzung wird auf etablierte Methoden zurückgegriffen.

Sind alle Funktionen im Wechselrichter umgesetzt, so erhält man ein gutes Werkzeug für die zu entwickelnde „Intelligente Ladesäule“. Mit ihr soll in Verbindung mit einem intelligenten Energienetz die Netzqualität verbessert werden. Die „Intelligente Ladesäule“ wird eine Kommunikationsschnittstelle aufweisen, womit sie im intelligenten Energienetz mit anderen Betriebsmitteln kommunizieren kann. Auch soll sie einen vorgegebenen Leistungsfaktor einstellen können und das Netz selbstständig nach Oberwellenanteilen analysieren und kompensieren. Teil dieser Arbeit ist es, den Wechselrichter mit der Funktion des Phasenschieberbetriebs sowie einer Stromregelung in Betrieb zu nehmen. Dabei ist auf eine Modulare aufbauweise der Softwaremodule zu achten, so dass eine vielfältige Nutzung dieser möglich ist. Außerdem muss eine Inbetriebnahmeroutine erarbeitet werden. Das Kapitel 1 gibt einen Überblick über alle benötigten mathematischen Verfahren um eine Umsetzung zu gewährleisten.

1.1 Aufbau eines Dreiphasenwechselstromsystems

In der Bundesrepublik Deutschland ist das Energieversorgungsnetz für industrielle, gewerbliche und private Verbraucher in der Regel ein Dreiphasenwechselstromsystem. In jeder der drei Phasen ist im Idealfall eine Sinusschwingung mit einer Frequenz von 50 Hz und einer Amplitude von 325 V vorzufinden. Zeitlich gesehen unterscheiden sich die Sinusschwingungen in den drei Strängen von der Phasenlage und sind um jeweils 120° zur benachbarten Phase verschoben, wie in Abbildung 1-1 dargestellt.

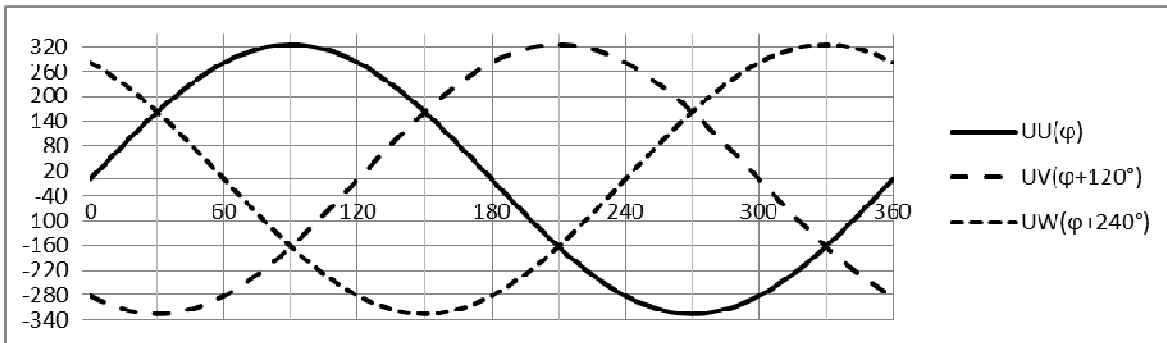


Abbildung 1-1: Verlauf einer Dreiphasenwechselspannung über einen Winkel von 360°

Als zeitlich veränderbare Zeiger betrachtet, entsteht ein dreiachsiges Koordinatensystem mit 120° Versatz zur benachbarten Phase, siehe Abbildung 1-2. Diese Eigenschaft wird beim Einsatz von linearen Bauelementen auch in die Ströme der drei Phasen eingeprägt. Die Ströme müssen nicht mit dem Phasenwinkel der Spannung übereinstimmen, durch eine unsymmetrische Belastung können die Winkel der Phasenströme untereinander von 120° abweichen.

Spannungszeiger bei Phasenwinkel $0,5\text{rad}$

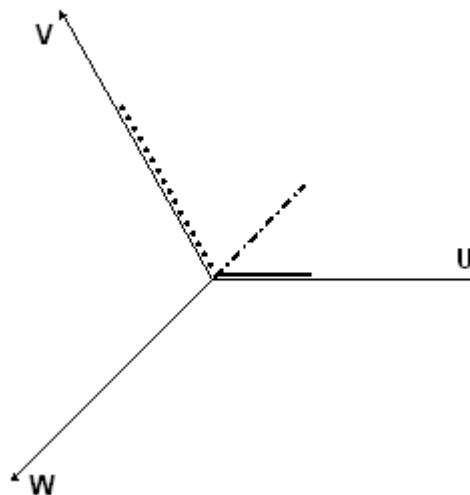


Abbildung 1-2: Spannungszeiger eines Dreiphasensystems bei $0,5\text{ rad}$

$$\begin{aligned}
 u_u(t) &= \hat{U} \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \\
 u_v(t) &= \hat{U} \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \frac{2\pi}{3}) \\
 u_w(t) &= \hat{U} \cdot \sin(2\pi f \cdot t - \frac{2\pi}{3})
 \end{aligned}
 \tag{F(1.1)}$$

1.2 Clarke-Transformation

Wie schon erwähnt und anhand von Abbildung 1-2 ersichtlich, können in einem Dreiphasenwechselstromsystem die elektrischen Größen durch drei Zeiger, welche untereinander in einem Winkel von 120° versetzt sind, als zeitlich veränderliche Zeiger abgebildet werden. Mittels der Clarke-Transformation werden diese drei Zeiger in ein Koordinatensystem aus zwei Achsen überführt, um ein zweiphasiges orthogonales System zu bilden. Der dabei entstehende Zeiger wird Dreh- oder auch Raumzeiger genannt und wird durch einen Real- und Imaginärteil dargestellt. Der Drehwinkel Theta wird aus diesen beiden Anteilen berechnet. Dieser wird im Weiteren für die Park-Transformation benötigt. Der Raumzeiger ergibt sich aus der geometrischen Addition der drei Phasenzeiger.

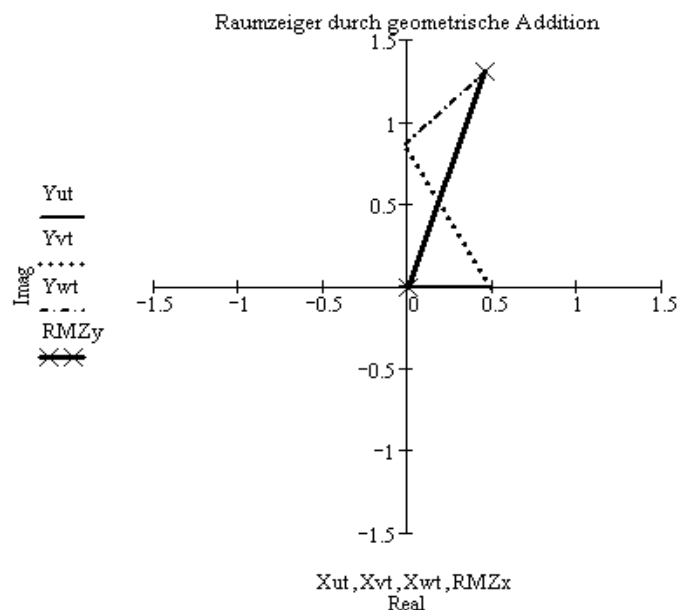


Abbildung 1-3: Raumzeiger aus geometrischer Addition der Spannungszeiger U, V und W bei 0,5 rad

Als Korrekturfaktor muss zum entstandenen Raumzeiger noch der Faktor zwei Drittel multipliziert werden, da hier von einem um 120° versetztes dreiachsiges Koordinatensystem in ein zweiachsiges orthogonales transformiert wird.

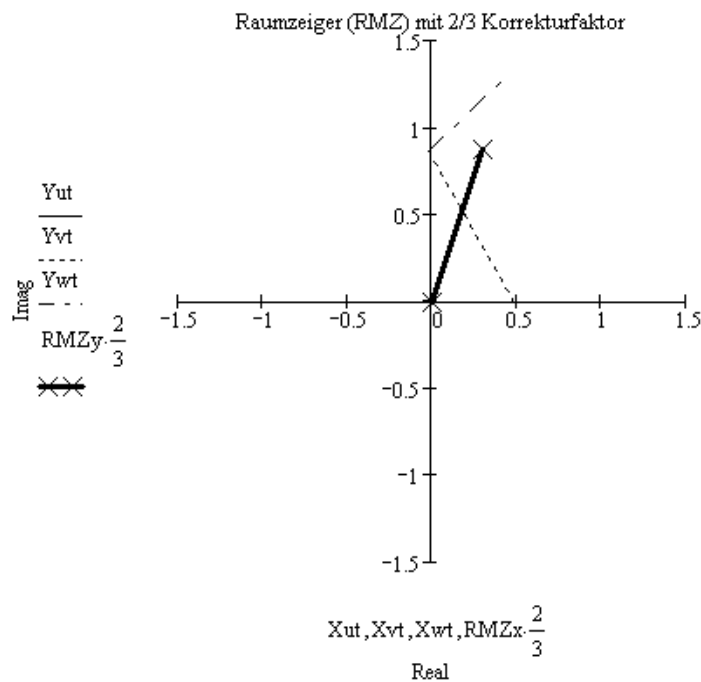


Abbildung 1-4: Raumzeiger nach vollständiger Clarke-Transformation für Phi von 0,5 rad

Unter der Annahme, dass das zu messende System symmetrisch ist, also sich die drei zu messenden Komponenten jederzeit zu Null addieren, siehe Formel F(1.2), gilt die vereinfachte Formel F(1.3) der Clarke-Transformation.⁵

$$U_u(t) + U_v(t) + U_w(t) = 0 \quad \text{F(1.2)}$$

$$\begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_u \\ U_v \end{pmatrix} \quad \text{F(1.3)}$$

Für den Betrieb symmetrischer elektrischer Verbraucher, wie Asynchronmotoren, ist dies in der Regel der Fall. Ein an das Netz angeschlossener Wechselrichter findet symmetrische Bedingungen häufig nicht vor. Der Sternpunkt der drei Leiterspannungen aus Abbildung 1-2 kann somit aus dem Nullpunkt des dreiachsigen Koordinatensystems verschoben sein. Beim Einspeisen in das Netz ist der Wechselrichter nicht fähig, gezielt eine Sternpunktverlagerung zu erkennen und/oder diese auszugleichen, sodass in einem ungünstigen Fall zu hohe Ausgleichsströme fließen könnten. Die vereinfachte Clarke-Transformation sollte hier nicht angewendet werden, denn auch die DIN V VDE V 0126-1-1 (Februar 2006) sieht eine „Einrichtung zur Netzüberwachung mit zugeordneten Schaltorganen“ (ENS) vor. Daraus ergibt sich eine zwingend erforderliche Messung aller drei Phasenspannungen und -ströme. Dadurch sollen Fehler im Netz erkannt werden und den Wechselrichter abschalten. Zum Beispiel beim Ausfall einer Phase. Die vollständige Clarke-Transformation enthält

⁵ [Tesa1998], S. 4

neben den realen und imaginären Komponenten noch eine Nullkomponente. Diese Nullkomponente gibt an, wie weit der Mittelpunkt des Koordinatensystems aus der Symmetrie nach Formel F(1.2) verschoben ist. Nach Valentin⁶ ergibt sich folgende Transformationsvorschrift.

$$\underline{U}_{\alpha\beta\gamma} = \begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_u \\ U_v \\ U_w \end{pmatrix} \quad \text{F(1.4)}$$

Wie schon erwähnt entsteht aus der Transformation ein rotierender komplexer Zeiger $\underline{U}_{\alpha\beta\gamma}$, welcher mit der Phase U verknüpft ist und dessen Rotationsmittelpunkt durch die Komponente U_γ bestimmt wird.

$$\underline{U}_{\alpha\beta\gamma} = U_\alpha + jU_\beta \quad \text{F(1.5)}$$

Somit kann nach der Transformation mit den Regeln der komplexen Rechnung weiter gearbeitet werden. Für den Winkel Theta ergibt sich mit der Korrektur von 0 bis 2 Pi:

$$\vartheta_u = \begin{cases} \arctan\left(\frac{U_\beta}{U_\alpha}\right) + \pi & \text{für } (U_\beta \geq 0 \cap U_\alpha < 0) \cup (U_\beta < 0 \cap U_\alpha \leq 0) \\ \arctan\left(\frac{U_\beta}{U_\alpha}\right) + 2 \cdot \pi & \text{für } U_\beta < 0 \cap U_\alpha > 0 \\ \arctan\left(\frac{U_\beta}{U_\alpha}\right) & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{F(1.6)}$$

Die Größen der Clarke-Transformation werden für die Erzeugung der Pulsmuster benötigt. Aus ihnen werden die Transistorschaltzeiten berechnet, worauf an dieser Stelle allerdings nicht näher eingegangen werden kann, da es nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist. Weiterführende Literatur dazu ist beispielsweise beim Autor Quang⁷ zu finden.

1.3 Park-Transformation

Der rotierende Spannungsraumzeiger der Netzspannung aus der Clarke-Transformation wird in der komplexen Zahlenebene betrachtet mit der reellen Achse eines Koordinatensystems verknüpft. Als Bezugspunkt wird die erste Phase U bzw. $L1$ verwendet. Zeitlich betrachtet entsteht ein rotierendes Koordinatensystem mit der Realachse „d“, der Imaginärachse „q“ und der Winkelgeschwindigkeit der Netzfrequenz ω_{Netz} . Die einzelnen drei Phasenströme sollen auf zwei Gleichgrößen reduziert werden. Das rotierende Koordinatensystem erhält dafür den Winkel des rotierenden Spannungszeigers der Netzspannung aus der

⁶ [Vale2006], S. 37f.

⁷ [Quan1993], S. 41 - 44 und 48 - 49

The diagram illustrates the relationship between current components i_q and i_d in a coordinate system rotated by θ_U . The voltage components U_β and U_α are also shown. The angle θ_i is the angle between the i_d axis and the U_α axis. The angle θ_U is the angle between the U_α axis and the U_β axis, given by $\arctan(U_\beta/U_\alpha) = \theta_U$. The angle θ_i is also indicated between the i_d axis and the U_α axis.

Die vollständige Park-Transformation für ein nichtsymmetrisches Dreileitersystem ist laut dem deutschen Ingenieur Robert Herbert Park⁸ wie folgt definiert:

$$I_{dq0} = \begin{pmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_0(t) \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\vartheta_u) & \cos\left(\vartheta_u - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\vartheta_u + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\vartheta_u) & -\sin\left(\vartheta_u - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\vartheta_u + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_u(t) \\ i_v(t) \\ i_w(t) \end{pmatrix} \quad \text{F(1.7)}$$

$$\begin{bmatrix} i_d(t) & i_q(t) & i_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha(t) & i_\beta(t) & i_0(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_u) & \sin(\vartheta_u) & 0 \\ -\sin(\vartheta_u) & \cos(\vartheta_u) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{F(1.8)}$$

⁹ [Vale2006], S. 38

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} i_d(t) & i_q(t) & i_0(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_u) & \sin(\vartheta_u) & 0 \\ -\sin(\vartheta_u) & \cos(\vartheta_u) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} i_\alpha(t) & i_\beta(t) & i_0(t) \end{bmatrix} \dots \\
& \dots \cdot \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_u) & \sin(\vartheta_u) & 0 \\ -\sin(\vartheta_u) & \cos(\vartheta_u) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_u) & \sin(\vartheta_u) & 0 \\ -\sin(\vartheta_u) & \cos(\vartheta_u) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}
\end{aligned} \tag{F(1.9)}$$

$$\begin{bmatrix} i_d(t) & i_q(t) & i_0(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_u) & -\sin(\vartheta_u) & 0 \\ \sin(\vartheta_u) & \cos(\vartheta_u) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha(t) & i_\beta(t) & i_0(t) \end{bmatrix} \tag{F(1.10)}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t) & i_\beta(t) & i_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d(t) & i_q(t) & i_0(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_u) & -\sin(\vartheta_u) & 0 \\ \sin(\vartheta_u) & \cos(\vartheta_u) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{F(1.11)}$$

1.4 Regelungstechnik

Die Regelungstechnik wird dann benötigt, wenn eine physikalische Größe eines Prozesses auf einen vorgegebenen Wert gehalten werden soll oder einem vorgegebenen zeitlichen Verlauf folgen soll. Dabei soll die Regelung in der Lage sein, dies unabhängig von äußeren Störungen mit größtmöglicher Genauigkeit zu leisten¹⁰. Damit ist jedoch nicht die Notwendigkeit der Regelungstechnik begründet. Nach Föllinger liegt ihre Begründung vielmehr in der Ausführung einer Regelungsaufgabe, zu welcher der Mensch aus Gründen der Schnelligkeit nicht in der Lage ist oder unter Bedingungen stattfindet, unter welchen der Mensch nicht fähig ist zu überleben¹¹. Auch kann der Wirkungsgrad durch eine Regelung gesteigert werden.

„Unter einer Regelung versteht man eine Anordnung, durch welche bei unvollständig bekannter Strecke, insbesondere unvollständiger Kenntnis der Störgröße, die Regelgröße, d.h. die Ausgangsgröße der Strecke, laufend gemessen und mit der Führungsgröße verglichen wird, um mittels der so gebildeten Differenz die Regelgröße an den Sollverlauf anzugleichen“¹²

Die digitale Verarbeitung in einem „Digitalen Signalprozessor“ (DSP) sieht den Entwurf einer zeitdiskrete Regelung vor. Allgemein kann der Regelkreis wie im folgenden Bild beschrieben werden.

¹⁰ Vergleiche dazu auch [Jörg1995], S. 1

¹¹ [Föll1990], S. 1

¹² [Föll1990], S. 4, (1.4)

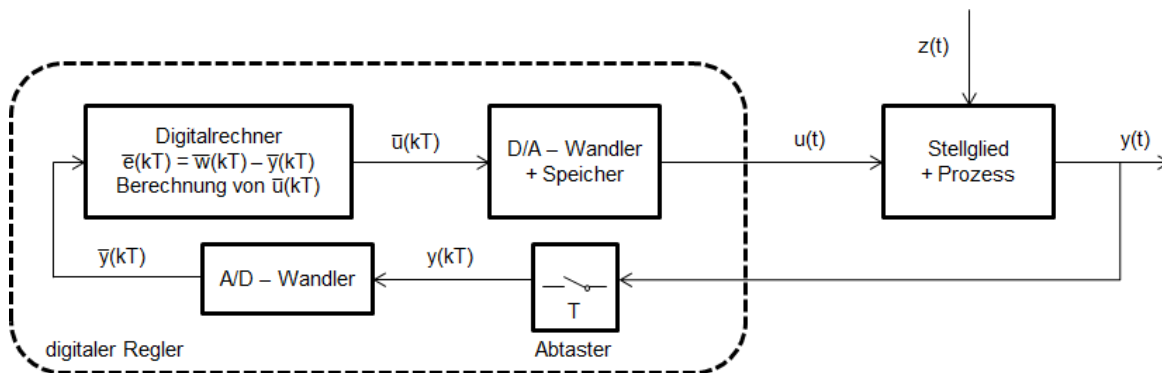


Abbildung 1-6 digitaler Regelkreis mit allen wesentlichen Elementen im Blockschaltbild nach [Jörg1994] S. 80

Dabei besteht der Prozess aus zeitlich veränderlichen Zuständen. Der „Abtaster“ ist für die Abtastfrequenz zuständig, zum Quantisieren der Regelgröße. Die Stellgröße $\bar{u}(kT)$ ist dann ein quasistetiges, treppenförmiges Signal und verändert sich schnellstens mit der Abtastfrequenz. Auch Geering¹³ beschreibt dies gleichermaßen. Der D/A-Wandler ist das Halteglied und wird in den meisten Fällen in „nullter Ordnung“ ausgeführt und wird mathematisch wie folgt beschrieben.

$$u(t) \equiv \bar{u}(kT) \quad kT + \Delta T \leq t \leq (k+1)T + \Delta T \quad F(1.12)$$

ΔT ist dabei die Rechenzeit vom Erfassen der Istwerte bis zur Ausgabe der neuen Stellgröße und wirkt sich auf den Regelkreis als zusätzliche Totzeit aus. Deshalb soll die Ausgabe unmittelbar nach dem erfassen aller Eingangsgrößen und der Berechnung erfolgen. Wird bis zum nächsten Abtastintervall gewartet, entsteht eine Totzeit so groß wie die Abtastzeit. Durch die sofortige Ausgabe der berechneten Werte kann bei kurzen Rechenzeiten die Totzeit vernachlässigt werden. Nach Geering muss dazu der Regelalgorithmus vom restlichen Programmteil entkoppelt sein und separat für die Regelaufgabe abgearbeitet werden.

1.4.1 Entwurf einer digitalen Regelung

Der Entwurf eines digitalen Reglers kann auf einen bereits entworfenen zeitkontinuierlichen Regler, umgesetzt in einen äquivalenten digitalen Regler zurückgeführt werden. Zuerst wird dabei ein zeitkontinuierlicher Regler entworfen und anschließend eine Auswahl über die Regelrate getroffen. Dafür muss das Verfahren der Messwerterfassung gewählt und das Shannon'sche Abtasttheorem eingehalten werden. Das daraus hervorgehende digitale Regelsystem muss asymptotisch stabil sein. Dafür kann die diskrete Nyquist-Kurve oder das Bode-Diagramm zur Auswertung genutzt werden.

¹³ Vgl. [Geer1990], S. 205f

1.4.1.1 Das Shannon'sche Abtasttheorem

Um eine stabile und sinnvolle digitale Regelung zu erhalten, muss das Shannon'sche Abtasttheorem erfüllt sein, also das abzutastende zeitkontinuierliche Signal sich in einem Frequenzintervall von $0 \dots \omega_{\max}$ befindet und die Abtastfrequenz genügend hoch ist um „alaising“, also Frequenzverfälschungen, zu verhindern.

$$\frac{1}{f_{\max}} = \frac{2\pi}{\omega_{\max}} > 2T \quad \text{F(1.13)}$$

Die Abtastfrequenz muss demnach mehr als zweimal so groß sein, wie die des höchsten Frequenzanteils. Sind höhere Frequenzen enthalten, so muss man diese herausfiltern. Für die Regelung eines Signals von 50 Hz ist eine Abtastfrequenz von 10 kHz ausreichend. Nach dem Abtasttheorem können Signale kleiner 5 kHz gemessen werden. Für eine spätere, in dieser Arbeit nicht behandelte Oberwellenkompensation ergibt sich daraus eine maximale Ordnungszahl von 99. Geering ist allerdings der Meinung, dass für regelungstechnische Anwendungen der Faktor auf 5T bis 10T verbessert werden müsse, da sonst die Signalform zu ungenau approximiert wird.¹⁴ Damit wird die maximale Ordnungszahl auf einen Bereich von 20 bis 40 begrenzt. Der zu entwerfende Regler soll später einmal für die Oberwellenkompensation genutzt werden können, deshalb wurde an dieser Stelle auf die Ordnungszahl der Oberwellen hingewiesen.

1.4.1.2 Abtastung nach Quang für Strommesswerte

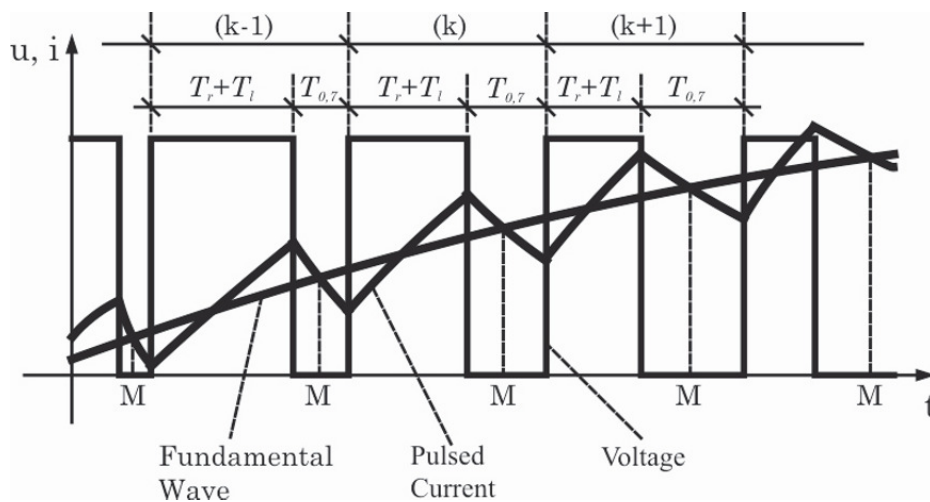
Quang beschreibt zwei Möglichkeiten der Erfassung von Stromistwerten.¹⁵ Zum einen eine Augenblickswerterfassung mittels eines A/D-Wandlers sowie eine integrierende Messung mittels eines U/f-Converters (VFC). Das erste Verfahren ist das technisch am einfachsten zu realisierende. Daneben bietet dieses Verfahren auch eine höhere Auflösung als die VFC. Als nachteilig hingegen beschreibt Quang die häufig vorkommende Erfassung von Stromoberwellen durch den Stromwandler, was diesen dabei durch die benötigten Filter in seiner Dynamik eingeschränkt.

Abbildung 1-7 zeigt das Messverfahren zur Istwerterfassung der Ströme. Die Markierung M gibt den Messzeitpunkt für die A/D-Wandlung an und ist bei einem der beiden Nullzeiger¹⁶ genau in der Mitte durchzuführen. Die Rechteckfunktion stellt den Ansteuerimpuls der Transistoren für eine Phase dar. Der mit $T_r + T_l$ gekennzeichnete Bereich lässt einen Stromfluss in der Phase zu. Die gezackte Kurve stellt den Stromfluss durch eine Induktivität mit den Steuerzeiten $T_r + T_l$ und den Nullzeigern dar. Die dritte Kurve ist eine Interpolation durch die Messpunkte M der gezackten Stromkurve.

¹⁴ siehe dazu [Geer1990] S. 211 und S. 214 Bild 12.6

¹⁵ Vgl. [Quan1993], S114 - 118

¹⁶ Die Transistoren sind so geschaltet, sodass kein Strom fließen kann.



**Abbildung 1-7 Augenblickswertmessung mittels A/D-Wandler nach [Quan1993] S. 115
Bild 4.1**

Wird das oben beschriebene Messverfahren so angewendet, kann ein sonst notwendiger Stromfilter weggelassen, sodass keine Effekte auf die Dynamik wirken. Quang weist auch darauf hin, dass sich für die Anwendung zur Ansteuerung von Motoren Nachteile der Stromwerterfassung beim Hochlaufen, Reversieren, Feldschwächung und so weiter ergeben. Es muss also jede Abtastung in der Mitte eines Nullzeigers, also wenn gerade keine Ströme fließen, erfolgen. Der Punkt ist im Bild mit M gekennzeichnet. Für den Netzbetrieb eines Wechselrichters ist es durchaus ohne Probleme möglich die vorgegebenen Abtastzeitpunkte einzuhalten. Da die Regelabtastfrequenz gleich der Pulsfrequenz ist, ergibt sich ein besseres Regelverhalten. Allerdings lässt sich dieses Verfahren bei großen Gradienten des Stromes schlecht realisieren.

Das VFC-Verfahren nach Quang ermittelt in einer Pulsfolge, proportional zur Messfrequenz mehrere Messwerte. Innerhalb einer Abtastperiode werden die auftretenden Pulse gezählt. Ein Filter wird durch die Anwendung der Messmethode aus dem zuvor beschriebenen Verfahren auch nicht benötigt. Sind nun alle Werte einer Pulsfolge erfasst, so wird darauf ein Interpolationsfilter 2. Ordnung angewandt.

$$\begin{aligned} \bar{i}_s(k) &= 1,83\bar{i}_s(k) - 1,16\bar{i}_s(k-1) + 0,33\bar{i}_s(k-2) \\ k &= 0,1,2,\dots,\infty \\ \bar{i}_s &= \text{integrierende Istwerte} \end{aligned} \quad \text{F(1.14)}$$

Nach Anwendung des Filters sollen die Ergebnisse weitgehend denen der Stromaugenblickswerte aus dem ersten Verfahren entsprechen. Allerdings gibt Quang zu bedenken, dass es sich dabei um Mittelwerte handle, was Konsequenzen bezüglich der Auslegung des Stromreglers nach sich zieht. Außerdem wird hierbei die Regelabtastfrequenz verkleinert, was sich wiederum negativ auf den Regler auswirkt. Abbildung 1-8 zeigt das Verfahren der Messwerterfassung dieser Methode. Es fällt auf, dass bei dem Nullzeiger mehrere Messwerte genommen werden müssen, sowie die Abtastfrequenz für eine Taktung mit 10 kHz auf 5 kHz herabgesenkt wird.

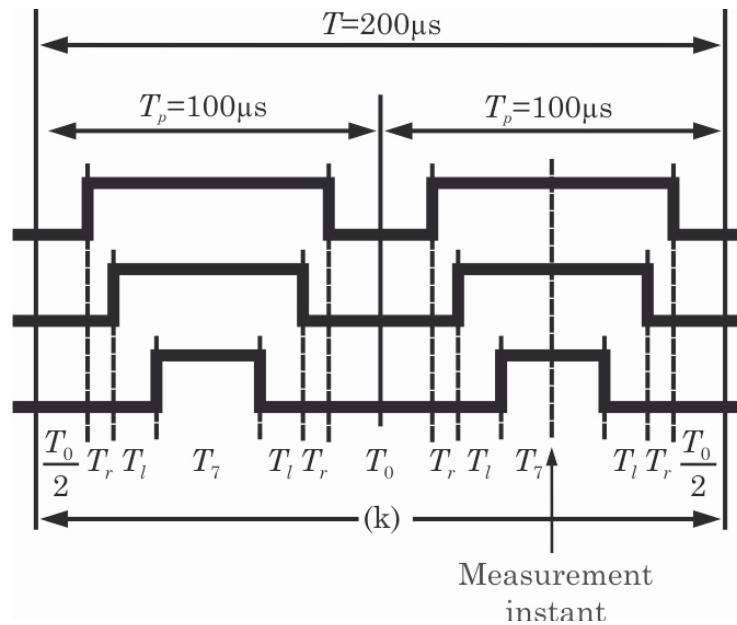


Abbildung 1-8 Messwertverfassung des VFC-Verfahrens nach Quang [Quan1993] S. 117

1.4.1.3 Messwerterfassung mit Amplituden-Abtastung

Der Wechselrichter arbeitet mit einer Frequenz von 10 kHz. Die Regelung soll zunächst mittels der Amplituden-Abtastung (Augenblickswertmessung nach Quang) realisiert werden und arbeitet ebenfalls mit einer Frequenz von 10 kHz. Das bedeutet, dass das Ausgangssignal in einem Bereich von $0 \leq t \leq \infty$ mit einer konstanten Abtastperiode T erfasst wird; $t=t_0$, $t=t_0+T$, $t=t_0+2T$ usw. Als Ergebnis erhalten wir ein zeitdiskretes Signal $\bar{y}(kT)$. Nach dem Verfahren von Quang ist die Abtastperiode auch konstant und variiert nicht innerhalb der 100 μs in Abhängigkeit von den beiden Nullzeigern. Zwischen zwei Abtastzeitpunkten ist keine Information über den Verlauf der Funktion bekannt. Bei dieser Darstellung des Signals stellt sich das Problem, dass dieses Signal nicht invertierbar ist. Deshalb kann das Signal auch in Form einer unendlichen Potenzreihe, der Z-Transformierten des Signals, geschrieben werden¹⁷.

$$Z\{\bar{y}(kT)\} = \sum_{k=0}^{\infty} \bar{y}(kT) z^{-k} \quad F(1.15)$$

Das erhaltene Ergebnis ist eindeutig und invertierbar. Der Vorteil der Z-Transformation besteht darin, dass mit ihr die zeitdiskrete transiente Antwort eines zeitdiskreten, linearen, zeitinvarianten, dynamischen Systems für ein beliebiges zeitdiskretes Eingangssignal analytisch berechnet werden kann.¹⁸ In unserem Fall würde dies auf das Totzeitglied des Wechselrichters zutreffen. Das Vorgehen hier ist sehr stark an das von Shannons zeitäquidistanten Messwerterfassung angelehnt, mit dem Ziel speziell die Grundschiwingung zu erfassen.

¹⁷ Vgl. [Vich1963], S. 3

¹⁸ Vgl. [Geer1990], S. 208

1.4.1.4 Der Regelalgorithmus eines PI-Reglers

Busch¹⁹ gibt an, dass ein kontinuierlich arbeitender PI-Regler aus zwei Anteilen mit P- und I-Verhalten bestehe. Die Regeldifferenz sei $e(t)$ und die Stellgröße $y(t)$.

$$y(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int e(t) dt \quad F(1.16)$$

1.4.2 Regelstrecke

Die gesamte Regelstrecke setzt sich aus den beiden Hauptkomponenten Wechselrichter und Transformator zusammen. Das Hauptaugenmerk liegt hier beim Transformator. Die Komponente des Wechselrichters kann anhand der Taktfrequenz oder mittels anderer Hardware jeweils angepasst werden. Im Nachfolgenden wird das Grundprinzip der Einspeisung erläutert und daraus die einzelnen Komponenten der Regelstrecke abgeleitet.

1.4.2.1 Grundprinzip der Einspeisung

Allgemein gilt, damit ein Energiefluss zustande kommt muss es ein Potentialgefälle geben. In einem Gleichstromkreis einer Taschenlampe gibt es einen positiven und einen negativen Pol. Wird der Stromkreis durch Schließen des Schalters geschlossen, fließen Elektronen von einem zum anderen Pol durch die Lampe und bringen diese zum Leuchten. Dabei ist es unerheblich wie hoch die unterschiedlichen Potentiale sind, wichtig ist ein Potentialgefälle. Dies wurde früher unter anderem in der Kraftwerkstechnik beim Zuschalten der Generatoren an das Energienetz angewendet. Nach dem gleichen Prinzip funktioniert die Einspeisung des Wechselrichters in das Energienetz. Der Wechselrichter muss demzufolge ein höheres Potential aufweisen als das Energienetz selbst. Der Wechselrichter kann keine stufenlose Spannungshöhe einstellen, ihm stehen nur fünf Möglichkeiten zur Verfügung: $2/3 \cdot U_{zk}$, $1/3 \cdot U_{zk}$, Null, $-1/3 \cdot U_{zk}$, $-2/3 \cdot U_{zk}$. Bei einem idealen Stromkreis mit rein ohmschem Anteil würden zu den jeweiligen Spannungen auch die dazugehörigen Ströme fließen. Zur Begrenzung der Ströme wird eine sogenannte Glättungsdrossel, bestehend aus den Elementen R und L zwischen Wechselrichter und Netz geschaltet. Nun ist dafür gesorgt, dass der Strom nicht sprunghaft ansteigen kann. Die fünf möglichen Zustände des Wechselrichters werden nun zeitlich durch Ein- und Ausschalten so angesteuert, dass sich ein sinusförmiger Strom ergibt.

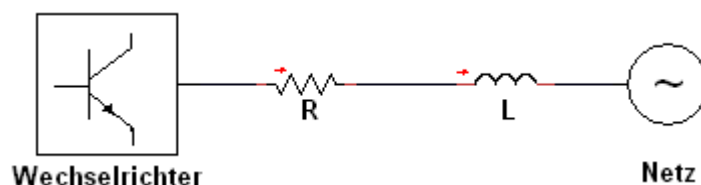


Abbildung 1-9 Einspeiseprinzip des Wechselrichters in das Energienetz

¹⁹ [Busc2009], S. 241

Im weiteren Verlauf wird der Transformator auf dieses oben abgebildete Prinzip vereinfacht.

1.4.2.2 Stellglied

Der Wechselrichter wird zum Einstellen der Stromhöhe verwendet. Es handelt sich um ein zeitdiskretes Element und müsste also ein Totzeitglied 1.Ordnung dargestellt werden. Im folgenden Verlauf wird es durch ein PT1-Glied ersetzt. Begründet wird dies mit der hohen Abtast- und Regelzeit und den im System vergleichsweise hohen Zeitkonstanten, sodass das Stellglied als kontinuierlich angesehen werden kann.

1.4.2.3 Regelstrecke

Die Regelstrecke wird der Transformator sein. Im Bild wurde er auf die Elemente R und L reduziert und ergibt damit eine lineare Differentialgleichung 1.-Ordnung mit konstanten Koeffizienten.

1.4.2.4 Messglied

Das Messglied ist nicht in Abbildung 1-9 dargestellt. Es wird benutzt um die Stromhöhe, ausgehend vom Wechselrichter über den Transformator zu erfassen.

1.4.3 Entwurfsverfahren

Das Entwurfsverfahren für einen Regler sieht folgende Schritte voraus. Zunächst einmal muss das zu regelnde System bestimmt werden. Dafür gibt es Varianten die das System mit sinusförmigen Schwingungen von verschiedenen Frequenzen anregen und die Antwort aufnehmen. Dabei setzt die erste voraus, dass das zu regelnde System sich dabei nicht selbst zerstört. Bei der mathematischen Variante ist zuvor eine Analyse und Beschreibung der Regelstrecke in Gleichungen nötig. Es gibt eine Vielzahl von Stabilitätskriterien mit denen man meist einen guten Ausgangspunkt zur Optimierung des Reglers erhält.

1.4.3.1 Stabilitätskriterium nach Bode

Ausgangspunkt ist die Annahme, der offene Regelkreis sei stabil und in seinem Phasen- und Amplitudengang stetig. Wird der Regelkreis geschlossen, so muss gelten:

$$\begin{aligned} |KG(j\omega)| &< 1 \\ \omega_o \angle G(j\omega) &= -180^\circ \end{aligned} \quad F(1.17)$$

Bei Erfüllung der zwei Bedingungen kann der Regelkreis mit der Small-Gain-Analyse näher untersucht werden. Dafür schließt man den Regelkreis. Der Amplitudengang muss hier wieder für alle Omega kleiner 1 und wie auch die Phase stetig sein. Aus dem erhaltenen Bode-Diagramm lässt sich nun die Amplitudenreserve ablesen. Diese sagt aus, um wie viel die Verstärkung vergrößert werden muss, damit der Regelkreis „grenzstabil“ wird, also der Faktor (K) um den der Betrag erhöht werden kann und dennoch kleiner als 1 bleibt, sowie der Winkel -180° beträgt.

Die Phasenreserve ist der Betrag, um den die Strecke reduziert werden muss, damit der Regelkreis „neutralstabil“ wird. Das heißt, der Betrag, um den die Phase größer ist als -180° , wenn $|KG(j\omega)|=1$. Dabei spricht man auch von Überschneidungsfrequenz.

1.5 Reglerentwurf und -optimierung

Ein Regler kann beliebig schnell neue Ausgabewerte vorgeben. In einigen Bereichen werden die vorgegebenen Werte des Reglers vom zu regelnden System gut angenommen. In anderen Bereichen kann es dagegen dazu führen, dass der Regler ein unerwünschtes schwingendes System erzeugt. Um ein unerwünschtes Verhalten zu verhindern gibt es mehrere Optimierungsmethoden. Für den zu entwerfenden Regler werden das Betragsoptimum sowie das symmetrische Optimum angewendet.

1.5.1 Betragsoptimum

Das Betragsoptimum ist besonders gut geeignet für Strecken mit PT2-Verhalten, wofür man üblicherweise einen PI-Regler verwendet. $G_S(s)$ aus Formel F(1.18) gibt die Grundform einer PT2-Strecke an.

$$G_S(s) = \frac{K_S}{(1+T_1s) \cdot (1+T_2s)} \quad \text{F(1.18)}$$

Unter der Bedingung dass $4T_2 < T_1$ ist, wobei T_1 die größere der beiden Zeitkonstanten ist, wird der Regler nach dem Betragsoptimum eingestellt. Der PI-Regler selbst besitzt folgende Übertragungsfunktion:

$$G_R(s) = k_R \left(1 + \frac{1}{T_R s} \right) = k_R \left(\frac{T_R s + 1}{T_R s} \right) \quad \text{F(1.19)}$$

Nach dem Betragsoptimum werden die Parameter T_R und K_R wie folgt bestimmt.

$$\begin{aligned} T_R &= T_1 \\ K_R &= \frac{T_1}{2 \cdot T_2 \cdot K_S} \end{aligned} \quad \text{F(1.20)} \quad ^{20}$$

Bei optimalen Reglereinstellungen kann die Führungsübertragungsfunktion der PT2-Strecke durch eine Ersatzfunktion als PT1-Strecke angenähert beschrieben werden.

1.5.2 Symmetrisches Optimum

Soll eine stationäre Regelabweichung auch bei Störungen zu Null ausgeregelt werden, dann wird für Strecken mit einem nicht kompensierbaren Integralanteil und PT1-Verhalten

²⁰ [Föll1990] S. 259 Formel (7.69)

die Reglereinstellungen nach dem symmetrischen Optimum ermittelt. Dies wäre bei einer Strecke mit folgender Funktion der Fall.

$$G_s(s) = \frac{K_s}{s} \cdot \frac{1}{1 + T_2 s} \quad \text{F(1.21)}$$

T_2 ist hier die nicht kompensierbare Zeitkonstante und kann sich als Summe aus mehreren Zeitkonstanten zusammensetzen. Die allgemeinen Einstellregeln eines PI-Reglers nach dem symmetrischen Optimum sind bei Föllinger wie folgt angegeben.²¹

$$T_R = 4 \cdot T_2 \quad \text{F(1.22)}$$

$$K_R = \frac{1}{2 \cdot K_s \cdot T_2} \quad \text{F(1.23)}$$

Damit soll man ein gutes Störverhalten erreichen, jedoch mit einem deutlich schwächer gedämpften Führungsverhalten als beim Betragsoptimum. Um ein Überschwingen bei einer Sprungantwort zu vermeiden muss die Führungsgröße mit einem Tiefpass 1. Ordnung mit der Zeitkonstante der Strecke von $4 \cdot T_2$ gedämpft werden.

²¹ Vgl. [Föll1990], S. 263 Tabelle 7/4

2 Entwurf des PI-Reglers

Über einen Stelltransformator an den Labortischen der Hochschule Mittweida soll geregelt in das Energienetz eingespeist werden. An diesem Vorhaben sind mehrere Komponenten beteiligt, welche gemeinsam den Regelkreis darstellen

Eine der Hauptaufgaben besteht darin, einen PI-Regler für den im Labor vorhandenen Stelltransformator zu entwerfen. Zunächst muss dazu als erstes eine Analyse des zu regelnden Systems erfolgen. Ist die Regelstrecke sowie der Regelkreis bekannt, so lässt sich eine Stabilitätsbetrachtung nach Bode durchführen. Um nun die allgemeinen Anforderungen an eine Regelung zu erfüllen wird das Verfahren des Betragsoptimums verwendet. Allgemeine Anforderungen an eine Regelung sind für den nicht versierten Leser in der einschlägigen Literatur zu ergründen.²² Das Verfahren des symmetrischen Optimums kommt wegen der Neigung zum stärkeren Überspringen nicht in Betracht. Zum Ende des Kapitels sind dem Leser die Regelstrecke sowie die Regelparameter eines PI-Reglers bekannt.

2.1 Ermittlung der Parameter des Stelltransformators

Der Stelltransformator ist ein Teil der Regelstrecke. Für einen Reglerentwurf müssen seine Parameter bekannt sein. Diese wurden unter anderem durch Leerlauf- und Kurzschlussmessungen ermittelt und können aus dem Anhang [A2] entnommen werden. Im Simulationsprogramm *Portunus* wird ein Transformator mit nachfolgendem Ersatzschaltbild definiert. Alle einzelnen Ersatzelemente wurden für den Transformator bei einer Einstellung des Übersetzungsverhältnisses von 70 Prozent berechnet und in *Portunus* eingegeben.

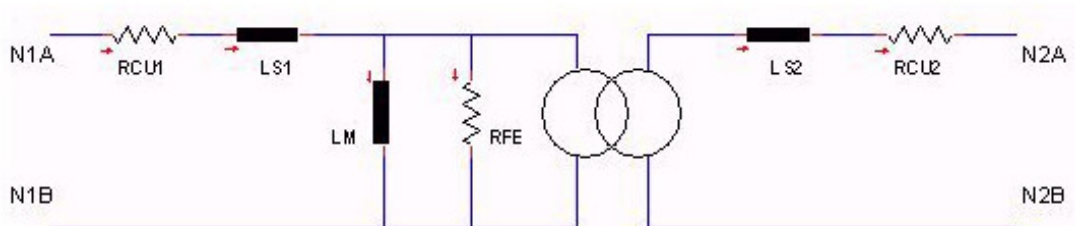


Abbildung 2-10 Ersatzschaltbild des Transformators in *Portunus*

Aus drei einzelnen Transformatoren wurde dann die Verschaltung für den Dreiphasenstelltransformator des Labors nach Abbildung 2-11 in *Portunus* nachgebildet. Es handelt sich hierbei um drei Spartransformatoren mit gemeinsamer Masse.

²² Vgl. [Föll1990], S. 10; [Geer1990] S. 4 - 9

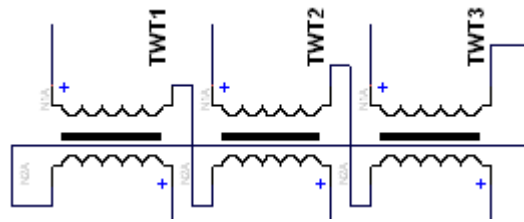


Abbildung 2-11 Labortischtransformatornachbildung in *Portunus* aus drei Trafos

In der Anlage [A2] werden Formeln für den Kupferwiderstand und die gesamte Streuinduktivität in einem Geltungsbereich des Stellrades am Transformator von 50 bis 100 Prozent approximiert.

Für den gesamten Kupferwiderstand gilt eine Funktion abhängig vom Übersetzungsverhältnis \ddot{u} .

$$R_{Cu}(\ddot{u}) = -0,0745 \cdot \ddot{u} + 7,5 \quad \text{F(2.24)}$$

Für die Gesamtstreuinduktivität:

$$L_s(\ddot{u}) = \frac{0,00513 \cdot \ddot{u}^2 - 1,043 \cdot \ddot{u} + 52,96}{1000} \quad \text{F(2.25)}$$

Ein Problem könnte hier in der praktischen Umsetzung beim Kupferwiderstand entstehen. Bei den Messungen hat sich gezeigt, dass der Kontaktwiderstand ohne Reiben des Graphitabnehmers Werte im Bereich von 30 bis 100 Ohm annehmen kann. Dies hätte einen zu hohen Spannungsabfall über den Querelementen zur Folge und kann dazu führen, dass das Übersetzungsverhältnis des Transformators nicht mehr ausreicht, um ins Netz einspeisen zu können.

2.2 Reduzieren des Transformatorersatzschaltbildes

Im Kapitel 1.4.2.1 wurde das Grundprinzip der Einspeisung erläutert. Nun muss für den Reglerentwurf der Transformator auf ein vereinfachtes Transformatorersatzschaltbild wie in Abbildung 1-9 zurückgeführt werden. Zunächst wird dazu die Übersetzung auf eine Seite des T-Ersatzschaltbildes eingerechnet, wofür die Netzseite herangezogen wird. Man erhält folgendes Ersatzschaltbild.

$$R_{Trafo} = RCU2 \cdot \ddot{u}^2 \quad \text{F(2.26)}$$

$$L_{Trafo} = LS2 \cdot \ddot{u} \quad \text{F(2.27)}$$

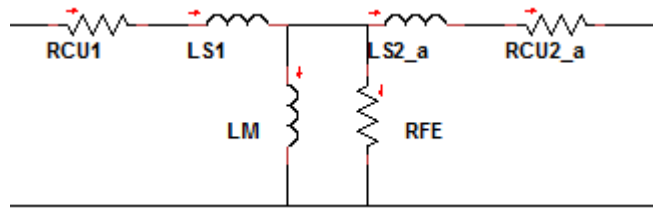


Abbildung 2-12 Transformatorersatzschaltbild bezogen auf die Spannungsebene des Wechselrichters

Zur weiteren Vereinfachung werden nun noch die Querelemente Eisenwiderstand und Hauptinduktivität entfernt. Die durch diese beiden Elemente entstehenden Stromflüsse sind im Vergleich zu den eingespeisten Strömen so gering, dass sie im Betriebsbereich von 1 A bis 5 A keine Störungen einbringen sollten. Es werden hier Magnetisierungsströme von 100 mA bis 150 mA überlagert. Beim Ausregeln von 0 A werden die Einflüsse deutlich und der Regler muss darauf reagieren können. Was vom Ersatzschaltbild übrig bleibt sind die Längselemente. Streuinduktivität und der Kupferwiderstand setzen sich nun wie folgt zusammen.

$$R_{Trafo} = RCU1 + RCU2_a \quad F(2.28)$$

$$L_{Trafo} = LS1 + LS2_a \quad F(2.29)$$

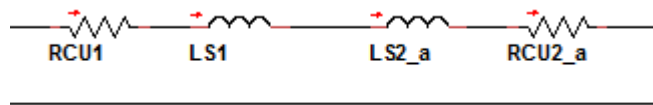


Abbildung 2-13 Vereinfachtes Transformatorersatzschaltbild bezogen auf die Spannungsebene des Wechselrichters

2.3 Aufstellen der Systemgleichungen

Der Wechselrichter ist als Stromquelle anzusehen und speist über eine Induktivität L mit dem Widerstand R einen Strom in das Netz ein. Dies muss durch eine Spannungsdifferenz zwischen Netz und Wechselrichter vorgenommen werden.

$$\Delta U_R = U_{Wechselrichter} - U_{Netz} \quad F(2.30)$$

Die Wechselrichterspannung ist die vom Wechselrichter errechnete Stellspannung, die ausgegeben werden soll und ergibt sich aus:

$$U_{Wechselrichter} = L_{Trafo} \frac{di}{dt} + i \cdot R_{Trafo} \quad F(2.31)$$

Überführt in den Laplace-Bereich und umgestellt nach der zu regelnden Größe i ergibt sich folgendes:

$$i(s) = U_{\text{Wechselrichter}} \cdot \frac{\frac{1}{R_{\text{Trafo}}}}{\frac{L_{\text{Trafo}}}{R_{\text{Trafo}}} \cdot s + 1} \quad \text{F(2.32)}$$

Hiermit haben wir wieder eine Darstellung von der äußerst einfachen Form

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) \quad \text{F(2.33)}$$

mit einem komplexen Faktor $G(s)$, der nicht von der Eingangsgröße abhängig ist, sondern durch das System aus Widerstand und Induktivität beschrieben wird. Dies wird auch als Übertragungsfunktion bezeichnet. Geteilt durch den Widerstand des Transformators ergibt sich:

$$\frac{i(s)}{R_{\text{Trafo}}} = u_{\text{Wechselrichter}}(s) \cdot \frac{K_{\text{Proportional_Trafo}}}{1 + T_{\text{Grenz}} \cdot s} \quad \text{F(2.34)}$$

mit

$$K_{\text{Proportional_Trafo}} = \frac{1}{R_{\text{Trafo}}} \quad \text{F(2.35)}$$

mit

$$f_g = \frac{R_{\text{Trafo}}}{2\pi \cdot L_{\text{Trafo}}} \quad \text{F(2.36)}$$

$$T_{\text{Grenz}} = \frac{1}{f_g} \quad \text{F(2.37)}$$

Für die Übertragungsstrecke des Transformators ergibt sich ein Verzögerungsglied erster Ordnung (PT1-Glied) mit der Übertragungsfunktion von:

$$G_{\text{Trafo}}(s) = \frac{1/R_{\text{Trafo}}}{L_{\text{Trafo}}/R_{\text{Trafo}} \cdot s + 1} = \frac{0,100429}{0,00518357 \cdot s + 1} = \frac{19,375}{s + 192,917} \quad \text{F(2.38)}$$

Für R_{Trafo} und L_{Trafo} ergibt sich aus den Formeln F(2.24) und F(2.25) 9,957 Ohm und 0.0516128 Henry.

Der Wechselrichter

Für den Wechselrichter kann sich nur ein Totzeitglied ergeben. Vom Erfassen der Eingangsgrößen bis zur Ausgabe der neuen Stellgrößen vergeht durch interne Berechnungen und Beschreiben der PWM-Register eine Zeit, die Totzeit. Die Übertragungsfunktion des Totzeitgliedes lautet:

$$G_T(s) = e^{-T_i \cdot s} \quad \text{F(2.39)}$$

Um die Totzeit zu ermitteln wurde ein Programm geschrieben, welches beim Starten der A/D-Wandlung ein Ausgangsport des DSP einschaltet und zu Beginn des Setzens der Stellgröße wieder ausschaltet. Die dafür benötigte Zeit von 133 μs [A15] wurde mit einem Oszilloskop gemessen. Zur Vereinfachung des Reglerentwurfs kann aufgrund der hohen Abtastrate von 100 μs angenommen werden, dass es sich um einen kontinuierlichen Regler handelt. Somit vereinfacht sich das Totzeit-Glied zu einem PT1-Glied wie der Transformator.

$$G_{WR}(s) = \frac{K_{\text{Wechselrichter}}}{1 + T_{\text{Wechsel_Gernz}} \cdot s} \quad 23 \quad \text{F(2.40)}$$

Die eigentliche Totzeit des Wechselrichters darf nun nicht mehr zur direkten Auslegung des Reglers genutzt werden. Es muss als Ersatz eine Zeitkonstante für das PT1-Glied gefunden werden. Als Regel dafür werden zwei Drittel der Abtastzeit benötigt.

$$T_{\text{Wechsel_Gernz}} = \frac{3 \cdot T_A}{2} = \frac{3 \cdot 100 \mu\text{s}}{2} = 150 \mu\text{s} \quad \text{F(2.41)}$$

Das erhaltene Ergebnis von 150 μs liegt sehr nahe an der gemessenen Zeit von 133 μs . Die Verstärkung des Wechselrichters wird als 1 angenommen. Als Übertragungsfunktion in Zahlen ergibt sich für den Wechselrichter:

$$G_{WR}(s) = \frac{1}{1 + 150 \mu\text{s} \cdot s} = \frac{6666,6\bar{6}}{s + 6666,6\bar{6}} \quad \text{F(2.42)}$$

Die Messeinrichtung

Für die Spannungswandler wurde keine Betrachtung angestellt. Mit ihnen wird nur der statische Anteil der Alpha- und Beta-Werte erzeugt. Es ist Aufgabe des Reglers zeitliche Verschiebungen oder Änderungen der Ströme vorzunehmen. Direkt aus der Änderung des Stromes erfolgt eine Korrektur des statischen Anteils. Betrachtet wird demzufolge die Messapparatur für die Ströme. Sie besteht aus den Messwandlern und dem Stromversorgungsgerät mit Messwertausgabe. Beide können als Verzögerungsglieder erster Ordnung, verschaltet in Reihe beschrieben werden.

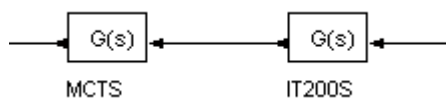


Abbildung 2-14 Übertragungsstrecke der Strommessapparatur

Die entsprechenden Werte dazu wurden den Datenblättern entnommen. Sowohl für Strom- als auch die Spannungswandler ergeben sich aus den Datenblättern Bandbreiten

²³ [RIEF2000] S. 343, Bild 7.26

von 150 kHz für die Stromwandler²⁴ mit dem Versorgungsgerät MCTS²⁵ bei einer Dämpfung von 1 dB und Phasenverschiebungen von weniger als 1 µs. Die Abtastfrequenz des DSPs liegt bei 10 kHz und somit weit unterhalb der maximal möglichen Bandbreite. Es wird deshalb postuliert, dass von der Messeinrichtung mit keiner Beeinflussung der Phasenlage zu rechnen ist. Zur Vereinfachung werden die Messglieder daher als Proportionalglieder angenommen. Am A/D-Wandlereingang ist ein Widerstand von 5 Ohm angebracht, der mit maximal mit 200mA bei 20A gespeist werden kann. Die Umrechnung der Ströme in Integervariablen sowie deren Anpassung wird softwaretechnisch vorgenommen. Die Verstärkung muss für den Reglerentwurf an das Übersetzungsverhältnis des Transformators angepasst werden.

$$G_{Mess}(s) = 1,42857142857 \quad F(2.43)$$

2.4 PI-Regelung

Der PI-Regler soll mit einer Frequenz von 10 kHz abgetastet werden. Die enthaltenen Zeitkonstanten im System in Verbindung mit der Abtastfrequenz lassen die Annahme zu, dass der zeitdiskrete digitale Regler sich wie ein kontinuierlich arbeitender analoger Regler verhält. Der in Abbildung 1-6 dargestellte Regelkreis reduziert sich somit auf den eines analogen Reglers wie im Folgenden abgebildet.

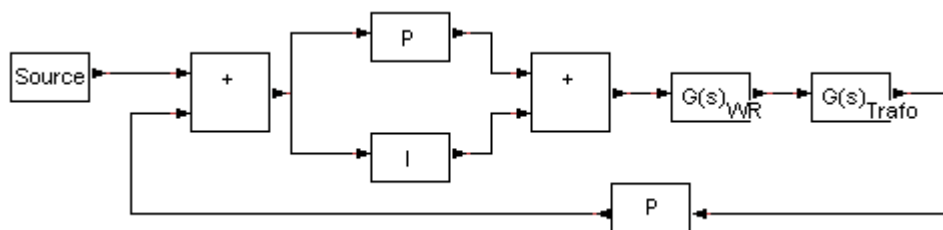


Abbildung 2-15 analoger Regelkreis mit PI-Regler des Testaufbaus Wechselrichter Transformator

Zwischen der Strecke und dem Summationsglied wird der zu entwerfende PI-Regler integriert. Eine Störgrößenaufschaltung ist nicht mit enthalten. Störgrößen sind noch unbekannt und müssten in späteren Versuchen ermittelt und der Regelkreis entsprechend erweitert werden, was in dieser Arbeit allerdings nicht vorgesehen ist. Das Bode-Diagramm der offenen Regelstrecke aus $G_{WR}(s)$ und $G_{Trafo}(s)$ ist im Anhang [A5] zu finden. Allgemein wird die Übertragungsfunktion des PI-Reglers²⁶ angegeben mit:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \frac{1 + T_n s}{T_n s} = K_R \frac{1 + T_n s}{T_n s} \quad F(2.44)$$

mit

²⁴ LEM-DS_it_200-s Ultrastab

²⁵ SIGNALTEC MCTS High Precision Bandbreite DC ... 1MHz

²⁶ Bspw. vgl. [Jörg1995] S.80 Formel (8.8)

$$K_R = \frac{K_p}{T_n} \quad \text{F(2.45)}$$

$$T_n = \frac{K_p}{K_i} \quad \text{F(2.46)}$$

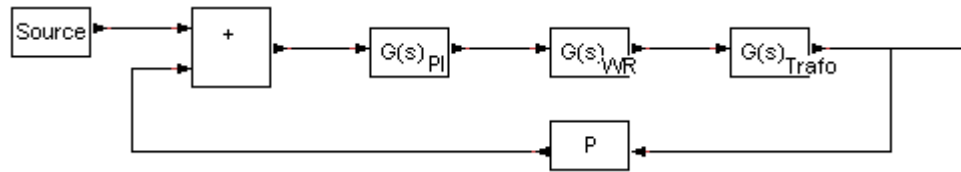


Abbildung 2-16 analoge Regelstrecke

Nun wird für die offene Regelstrecke die Übertragungsfunktion aufgestellt..

$$G(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \cdot \left(\frac{1}{0,00015s + 1} \right) \cdot \left(\frac{0,100429}{0,00518357 \cdot s + 1} \right) \quad \text{F(2.47)}$$

Als nächstes untersucht man die Stabilität des Systems.

2.4.1 Stabilität nach Bode

Auf dem Bode-Diagramm im Anhang [A7] ist zu erkennen, dass die erste Bedingung $|KG(j\omega)|$ erfüllt ist. Auch der Phasenwinkel von -180° wird nicht unterschritten. Demzufolge sind Phasen- und Amplitudengang stetig.

Soll das Betragsoptimum angewendet werden, so muss keine weitere Analyse mit dem Small-Gain-Kriterium erfolgen, da das Betragsoptimum eine Phasenreserve von 63° garantiert. Es muss nach Anwendung des Betragsoptimums noch einmal eine Betrachtung im Hinblick auf Stetigkeit und dem Einhalten des Phasenwinkels erfolgen. Liegt beides vor, so kann man von einem funktionierenden Regelkreis ausgehen.

2.4.2 Betragsoptimum

Nach den Regeln aus Kapitel 1.5.1 wird für die ermittelte Regelstrecke ein PI-Regler entworfen. Gegeben sind dabei folgende Werte:

Die größte Zeitkonstante der Regelstrecke kommt vom Transformator mit $T_1 = T_R = 0,00518357$ s. Die kleinere Zeitkonstante $T_2 = 0,00015$ s ist die des Wechselrichters. Mit der Streckenverstärkung $K_s = K_{WR} \cdot K_{Trafo} = 1 \cdot 0,1 = 0,1$ kann die Reglerverstärkung K_R berechnet werden.

$$K_R = \frac{T_1}{2 \cdot T_2 \cdot K_s} = \underline{\underline{172,0476}}$$

Das erhaltene Ergebnis ist gleichzeitig die gesuchte Proportionalverstärkung des PI-Reglers.

$$G_R(s) = k_R \left(1 + \frac{1}{T_R s} \right)$$

Die integrale Verstärkung, aus obiger Formel abgeleitet ergibt sich zu:

$$K_I = \frac{K_R}{T_R} = \underline{\underline{33190,944}} \quad \text{F(2.48)}$$

Zu den erhaltenen Werten der PI-Regelung ist im Anhang [A8] das zugehörige Bode-Diagramm abgebildet. Es ist erkennbar, dass noch eine Phasenreserve von 65° vorhanden ist.

2.5 Zusammenfassung zum Reglerentwurf

Es wurde das Gesamtsystem regelungstechnisch analysiert und mathematisch beschrieben. Die Strecke sowie der Kreis sind nach dem Bode-Kriterium stabil. Mittels des Betragsoptimums wurden für den bestimmten Regelkreis die Proportionalverstärkung und die Integralverstärkung bestimmt. Eine Bestimmung mittels des Symmetrischen Optimums wurde nicht vorgenommen, da dieses Verfahren mehr zum Überschwingen neigt als das Betragsoptimum. Sollte das Betragsoptimum ein Überschwingen erzeugen, so kann vor dem Eingang der Stellgröße ein PT1-Glied modelliert werden. Beim symmetrischen Optimum ist dies zwingend erforderlich und verbunden mit einem Dynamikverlust.

Die erhaltenen Reglerwerte für den Proportional- sowie den Integralanteil wurden in den Regelkreis eingearbeitet. Das daraus entstandene Bode-Diagramm lässt die Aussage zu, dass eine stabile Regelung mit ausreichender Phasenreserve entworfen wurde. Als Hinweis sei hier erwähnt, dass es sich um außergewöhnlich hohe Verstärkungen handelt. Es könnte zu Problemen in der Realität führen.

Da mit den gewonnenen Parametern über die gleiche Strecke zwei unterschiedliche Parameter geregelt werden sollen, empfiehlt es sich für einen der Regler die Verstärkungen zu vermindern. So wird ein Gegeneinanderarbeiten der Regler und ein eventuelles gegenseitiges Aufschwingen verhindert.

3 Simulationen

Im Vorfeld wurden für den zu entwickelnden Wechselrichter nach Quang nach der Methode der Raumzeigermodulation im Simulationsprogramm *Portunus* Berechnungen an einem idealen Modell mit idealen physikalischen Netzgrößen durchgeführt. In Abbildung 3-17 wird der simulative Aufbau des Computermodells gezeigt.

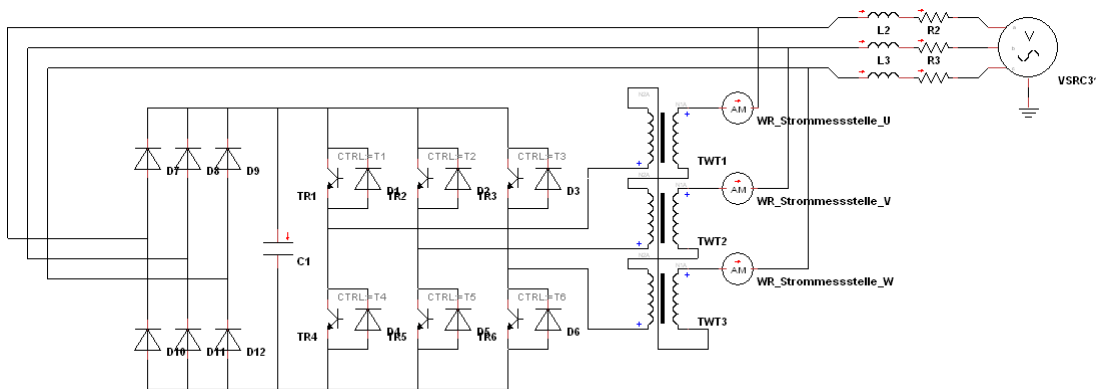


Abbildung 3-17 idealer Hardwareaufbau für die simulative Beschreibung des Wechselrichtermodells in *Portunus*

Von links nach rechts ist Folgendes zu sehen: Sechs Dioden mit direktem Anschluss an das Versorgungsnetz, zusammen geschaltet als eine B6U, gefolgt vom Zwischenkreiskondensator. Danach kommt der Leistungsteil aus Transistoren und Dioden. Die Diodenkonfiguration ist hier wieder eine B6U. In diesem Kapitel wird unter anderem untersucht, mit welchen Maßnahmen man die zweite B6U am Wechselrichterausgang vor Zerstörung schützen kann, denn die erste B6U wird geschützt durch eine, hier nicht mit abgebildete Schutzbeschaltung, integriert im Wechselrichtermodul. Die drei einzelnen Transformatoren stellen den Laborstelltransformator und somit auch die Regelstrecke dar und die drei Amperemeter sind die Messwandler für das berührungslose Strommessen im zu untersuchenden Aufbau. Schließlich zeigt Abbildung 3-17 die Netzinduktivität, die nach Schultz²⁷ entnommen worden ist. Hierbei handelt es sich konkret um die maximal zulässigen Bezugsimpedanzen aus der VDE 0838 Teil 3, EN 61000-3-3, die bei 50 Hz nicht überschritten werden sollten. Ganz links dargestellt ist die ideale dreiphasige Spannungsquelle mit den Parametern für das europäische Niederspannungsnetz.

Es müssen nun im Vorfeld simulativ Rahmenbedingungen untersucht werden. Es ist abzuklären ob es ausreicht, die beiden Transformationen in die unterschiedlichen Koordinatensysteme mit der vereinfachten Formel für symmetrische Systeme auch auf unsymmetrische Systeme anzuwenden. Es werden weiterhin die Einschaltvorgänge näher betrachtet, also ob beim Zuschalten des Wechselrichters an das Netz oder beim Starten der Raumzeigermodulation Stromspitzen auftreten. Es soll weiterhin gezeigt werden, ob ein Unter-

²⁷ [SCHU2004] S. 84 Formel (4.5) : $Z_{L_Null} = (0,4 + j0,25)\Omega = 0,4\Omega + \omega 0,8\text{mH}$

schied im Strom bei einem Sollwert von 0 A zwischen unregelter und geregelter Einspeisung zu verzeichnen ist. Die Regelung wird mit den erhaltenen Reglerwerten aus Kapitel 2 dimensioniert. Mittels einer Sprungantwort ist dann das Ansprechverhalten der Regelung zu überprüfen. Die Phasenverschiebung aus dem Frequenzgang des Reglers kann man anhand einer ausgewählten Frequenz des Sollwertes am Ausgang überprüfen und mit der aus dem Bode-Diagramm vergleichen.

Nach dem Test des Reglers muss für den Laboraufbau ein geeignetes Inbetriebnahmekonzept erarbeitet werden. Der zu entwickelnde Testaufbau soll für Forschung und Ausbildung zur Verfügung stehen. Es ist daher ein Schutz gegen das Zerstören der beteiligten Betriebsmittel zu entwickeln. Der entstehende Versuchsaufbau erfordert ein Zusammenspiel vieler Komponenten. Dabei ist eine Vielzahl von Verbindungsleitungen zu stecken. Das Fehlerpotential ist hierbei stark erhöht. Von den Studierenden kann nicht erwartet werden, dass sie alles richtig ausführen.

3.1 Ermittlung des Drehwinkels vom Energienetzes

Um mit der erzeugten Wechselspannung phasengleich zur Spannung des Energienetzes einspeisen zu können, muss aus den von der Netzspannung berechneten Alpha- und Beta-Werten der Drehwinkel des Netzspannungszeigers über die Formel F(1.6) berechnet werden. Abbildung 3-18 zeigt den Drehwinkel des Netzspannungsraumzeigers bei einer Sternpunktverlagerung der Spannungen. Der Drehwinkel wurde einmal mit vollständiger Formel F(1.4) und einmal mit unvollständiger Formel F(1.3) Transformation ermittelt.

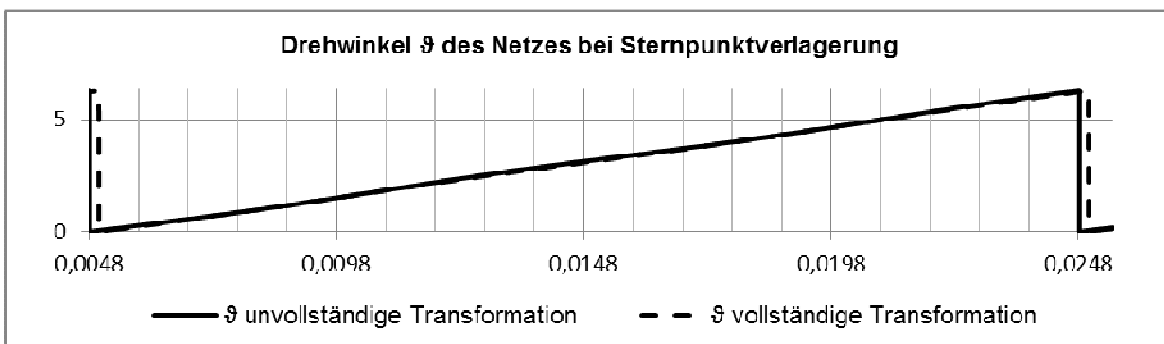


Abbildung 3-18 Drehwinkel des Netzspannungsraumzeiger bei Sternpunktverlagerung; unvollständige und vollständige Transformation

In diesem Bild fällt auf, dass die Flanken des Drehwinkels zu unterschiedlichen Zeiten auftreten. Für das simulierte Modell ist bei der unsymmetrischen Transformation eine Abweichung von 0,0008 s festgestellt worden.

Es sollte damit lediglich gezeigt werden, dass bei Unsymmetrien schon Abweichungen in den Eingangsdaten auftreten können. Es ging hier um eine qualitative Betrachtung mit dem Ziel, zu zeigen, dass beim Wechselrichterbetrieb eine vollständige Transformation vorgenommen werden muss.

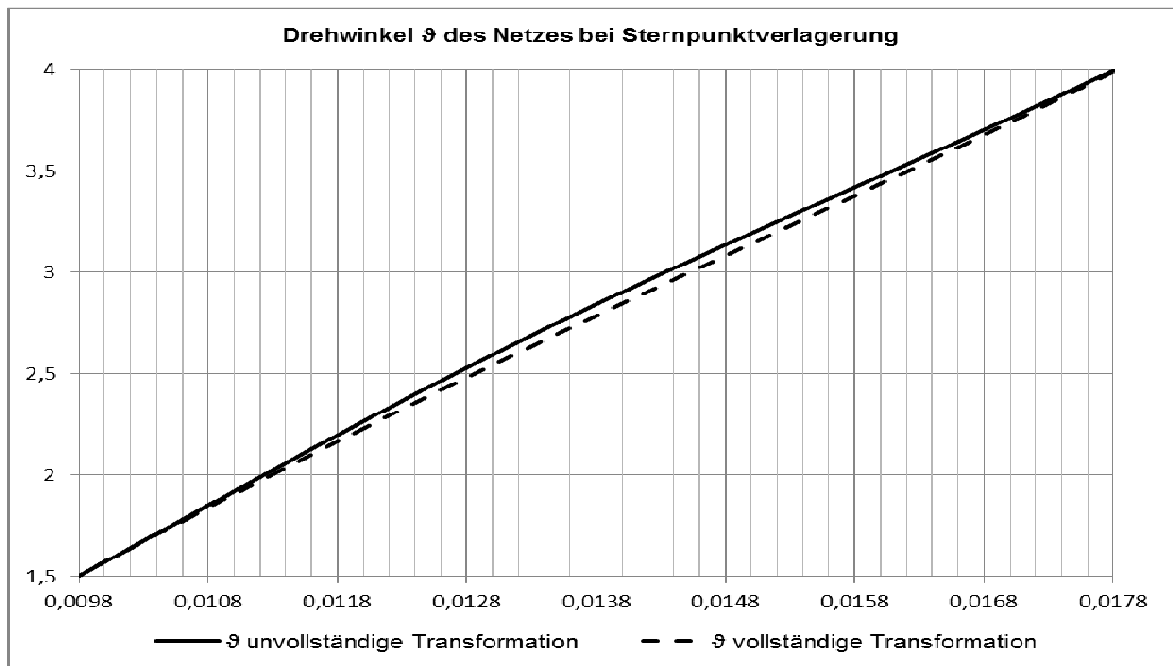


Abbildung 3-19 nicht linearer und linearer Verlauf des Drehwinkels

Ein weiteres Indiz dafür liefert das zweite Bild der Simulation. Der unvollständig transformierte Drehwinkel ist nicht linear ansteigend, sondern verläuft in einer Schlangenlinie. Dies hat wiederum zur Folge, dass zu einigen Zeitpunkten der korrekte Winkel angegeben wird und zu anderen nicht. Im ungünstigen Fall könnte dies auch negative Auswirkungen auf die Reglerdynamik haben. Damit liegt nun eine Begründung vor, warum eine vollständige Transformation nach der Formel F(1.4) vorgenommen werden muss. Ein einwandfreier Betrieb des Wechselrichters kann nur so damit gewährleistet werden.

3.2 Simulation des Zuschaltens ans Netz ohne Regelung bei 0A

Es soll hier am idealen Modell der Simulation gezeigt werden, wie sich der Wechselrichter beim Zuschalten an das Netz und Starten der Raumzeigermodulation verhält. Der Wechselrichter verhält sich wie bereits bekannt als eine regelbare Stromquelle und die dazugehörigen Ströme werden im Diagramm dargestellt. Der Sprung „Schuetz“ im Diagramm dient zur Markierung des Zeitpunktes, an dem der Wechselrichter direkt mit dem Netz verbunden ist. „RZMstart“ signalisiert den Zeitpunkt des Startens der Raumzeigermodulation. Bei Betrachtung der Ströme ist zum Start der Simulation zu erkennen, dass hier schon Strom fließt. Eine mögliche Erklärung gibt das Schaltbild des Transformators aus Abbildung 2-10. Zu Beginn des Einschaltvorganges sind in den Spulen und Widerständen noch keine Stromflüsse vorhanden. Sie müssen sich beim Einschalten erst einschwingen. Es entsteht eine Hüllkurve um die Sinusfunktionen wie die bei einem Kurzschluss, so wie es in der Fachliteratur zahlreich angegeben ist. Der Schwerpunkt liegt jetzt aber auf dem Moment der Einschaltvorgänge. Grundvoraussetzung ist, dass der Zwischenkreis vollständig aufgeladen ist, sodass kein Strom über die Freilaufdioden in den Wechselrichter fließen kann.

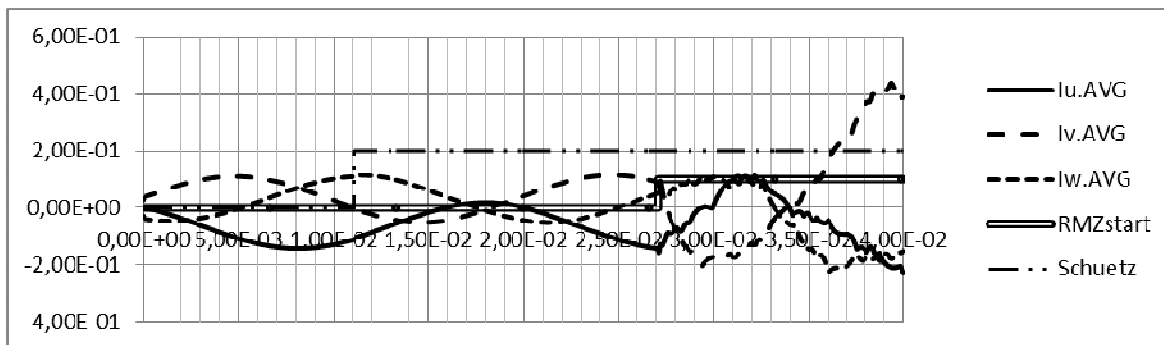


Abbildung 3-20 Ströme beim Einschaltvorgang des Wechselrichters

Wird das Schütz geschlossen so ist gut zu erkennen, dass sich an den Strömen nichts verändert. Die Raumzeigermodulation wurde so eingestellt, dass der Wechselrichter exakt den Spannungszeiger des Transformators auf der nach unten transformierten Seite nachbildet. Die Eingangsdaten der Raumzeigermodulation wurden durch Messwerterfassung und Weiterverarbeitung dieser Daten gewonnen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die erzeugte Wechselspannung in der Simulation phasengleich mit der des Netzes ist, was in der Realität nicht zu erwarten ist, da bis zur Ausgabe der Werte Rechenzeit benötigt wird. Gut zu erkennen ist, dass hier das - anscheinend allein durch Ungenauigkeiten beim Bilden der Gleitkommazahlen – es zu einem Anstieg der Ströme kommt. Das wiederum erweist sich als eine gute Basis, um darauf eine Regelung anzuwenden.

Die Alpha- und Betakomponenten müssen sich demnach aus einem statischen und einem dynamischen Anteil additiv zusammensetzen. Die drei Phasenströme für den Zeitpunkt an dem „RMZstart“ aus dem vorhergehenden Bild einen Sprung aufweist sind in den folgenden zwei Abbildungen dargestellt. In der ersten wird der Transformator auf allen Phasen gleich übersetzt, wohingegen die zweiten Abbildung Abweichungen von -1% bis 1% zur Phase V aufweist.

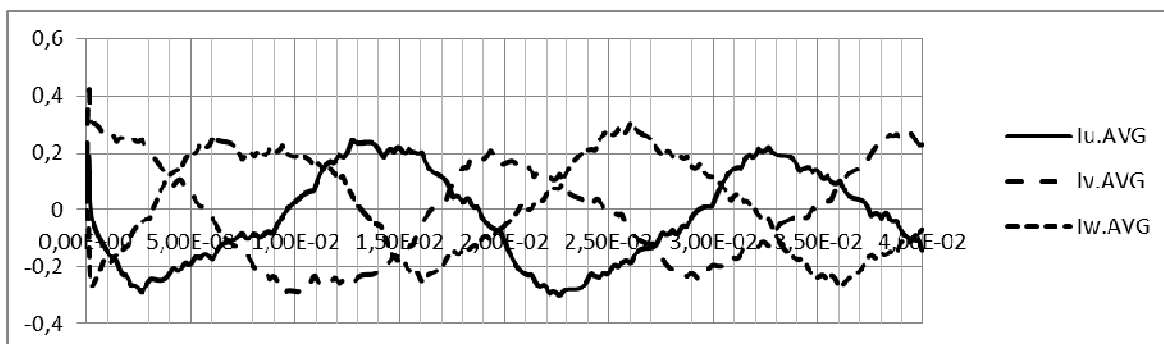


Abbildung 3-21 Ströme der drei Stränge bei symmetrischen Transformator

Damit wird eine Ungenauigkeit des Laborstelltransformators simuliert. Bei dem Stellwerk handelt es sich um eine mechanische Konstruktion aus einem Gummizahnriemen und Plastikzahnradern. Die oben angegebene Abweichung wurde von mir postuliert und zu weiteren Simulationen für die Regelung verwendet.

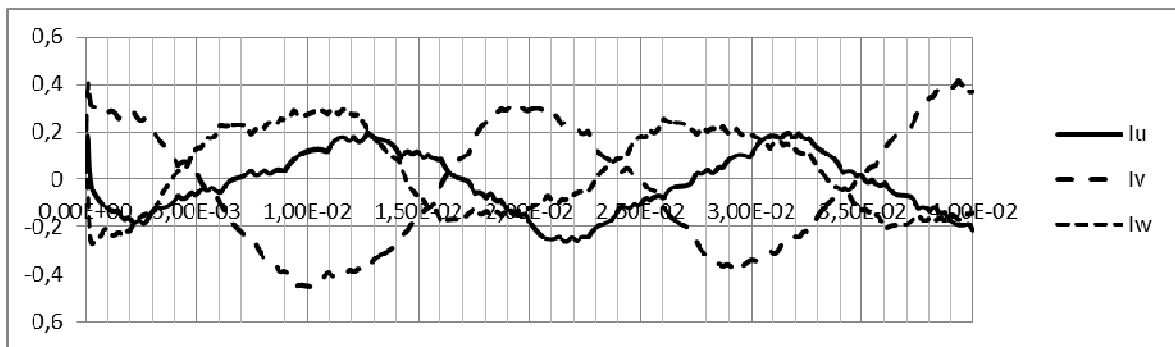


Abbildung 3-22 Ströme der drei Stränge bei unsymmetrischen Transformator mit -1% bis 1% Abweichung von der Phasen V und W

3.3 Simulation des Zuschaltens an das Netz mit PI-Regler bei einem Sollwert von 0 A

Die erhaltenen Reglerverstärkungen aus dem Betragsoptimum wurden in das Simulationsmodell eingearbeitet. Der Regler soll auf 0 A nachregeln. Wie man erkennt, beruhigen sich die Ströme beim symmetrischen Transformator deutlich schneller und liegen nach der Ausregelung unter 100 mA im Vergleich ohne Regelung. Dennoch ist es auch mit Regelung nicht möglich, exakt so in das Netz einzuspeisen, dass kein Stromfluss stattfindet. Die entstehenden Ströme sind jedoch auch hier nicht sinusförmig.

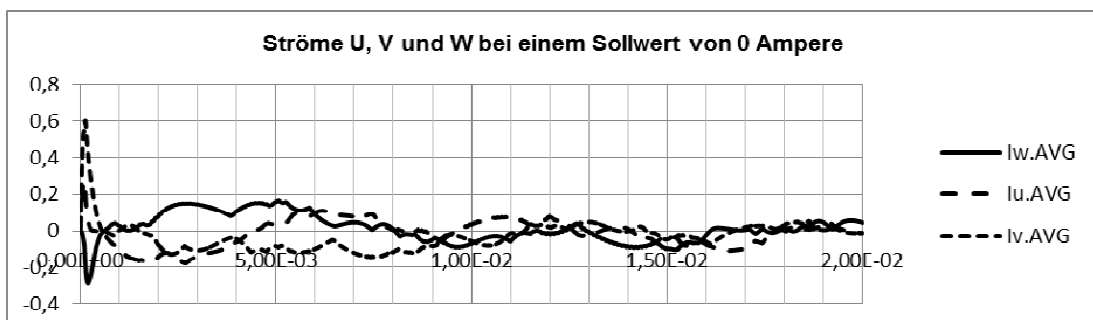


Abbildung 3-23 Ströme der drei Stränge bei symmetrischen Transformator mit eingeschalteter Regelung

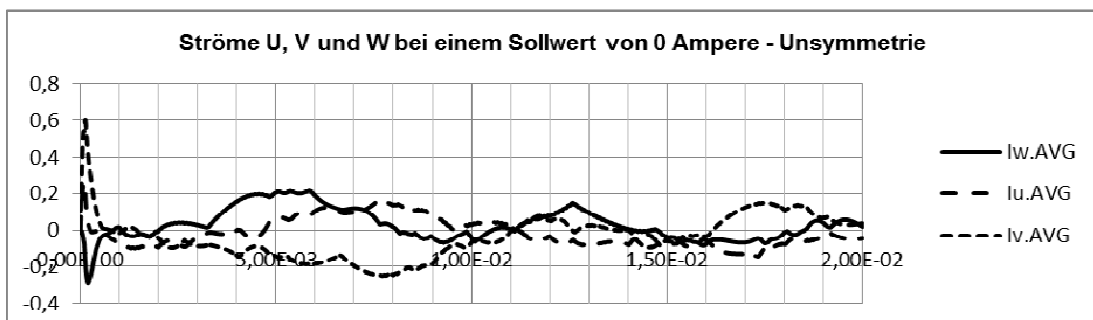


Abbildung 3-24 Ströme der drei Stränge bei unsymmetrischen Transformator mit -1% bis 1% Abweichung von der Phasen V und W mit eingeschalteter Regelung

Beim geregelten Einspeisen auf einen unsymmetrischen Transformator kann bei der Stromhöhe kein Vorteil erzielt werden. Lagen die Spitzenwerte vorher bei 100 mA können

diese nach der Ausregelung auf nur minimal 200 mA ausgeregelt werden. Aber auch hier kann kein sinusförmiger Stromfluss erreicht werden.

3.3.1 Regler Sprungantwort am Beispiel von I_d

Der PI-Regler wird mit einem Einheitssprung von 3 A belegt. Geregelt wird dabei die Grundschiwingung der Netzfrequenz. Anhand der Sprungfunktion lässt sich gut das Ansprechverhalten der Regelung veranschaulichen. Aus der Simulation ergibt sich ein Überspringen auf 3,141 A bei einem Sollwert von 3 A und entspricht 4,7 %. Die Anstiegszeit wurde mit 395 μ s ermittelt.

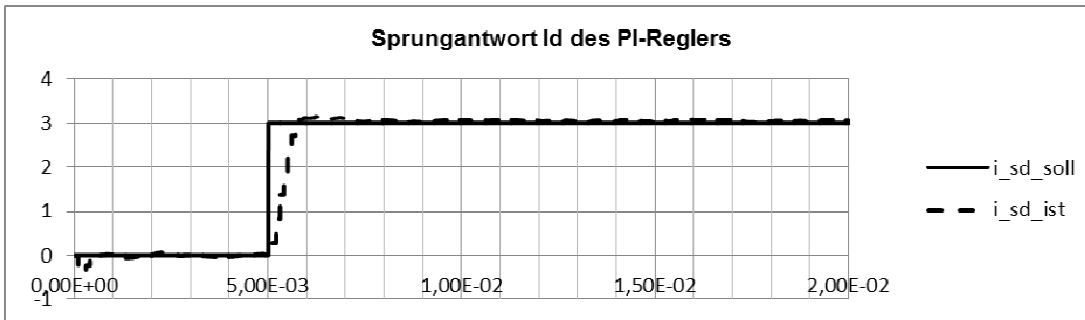


Abbildung 3-25 Sprungantwort des PI-Reglers für I_d

Im nachfolgendem Bild sind die Ströme der drei Leiter abgebildet. Es ist gut zu erkennen, dass bis zum Zeitpunkt von 5 ms der im Kapitel 3.3 beschriebene Stromverlauf vorgefunden werden kann. Die Ströme weisen nach der Sprungantwort durch die Regelung einen sinusförmigen Verlauf auf. Der Spitzenwert liegt bei 3 A.

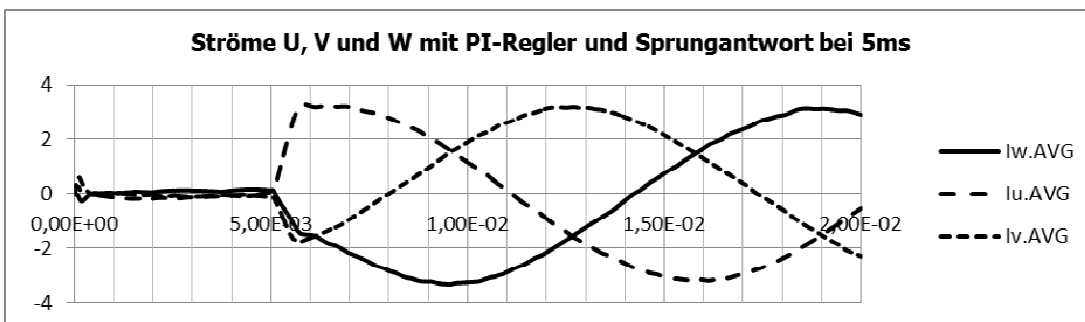


Abbildung 3-26 Stromverlauf in drei Phasen vor und nach der Sprungantwort

3.3.2 Einspeisen von auf die Grundfrequenz aufmodulierten Oberwellen

Hier soll die Dynamik des Reglers aufgezeigt werden. Der Regler ist mit seinen Parametern in der Lage zusätzlich zur Grundfrequenz von 50 Hz auch eine Oberwelle anderer Frequenzen zu überlagern. Abbildung 3-27 zeigt den Stromverlauf einer Phase. Der statische Strom liegt bei 2,5 A zusätzlich wird auf die Grundschiwingung eine Frequenz von 400 Hz auf moduliert. Die modulierte Schwingung hat zur Grundschiwingung der Netzfrequenz keinen Phasenversatz. Die zu erkennende Phasenverschiebung des aufmodulierten Anteils ergibt sich direkt aus dem Phasengang der Regelstrecke. In Zahlen ausgedrückt liegt sie

nach dem Bode-Diagramm bei $|110^\circ - 90^\circ| = 20^\circ$ und nach dem Simulationsergebnis bei ca. 22° . Abweichungen können hier infolge der Taktung von 100 μs der Raumzeigermodulation her stammen.

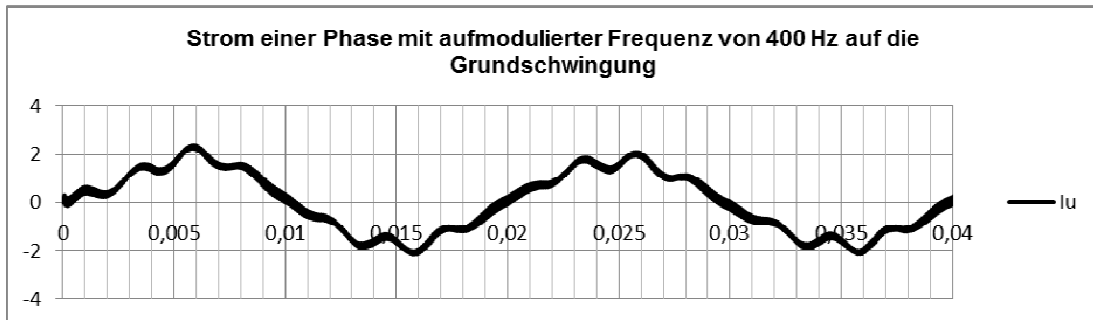


Abbildung 3-27 Grundschiwingung des Stromes einer Phase mit auf modulierter Oberwelle

3.4 Inbetriebnahme Algorithmus

Der Versuchsaufbau soll auch in der Ausbildung von Studenten genutzt werden können. Die Verdrahtung ist sehr aufwendig und kann bei falscher Anordnung zu Strömen außerhalb der Betriebsparameter führen. Der Wechselrichter soll daher eine Selbstdiagnose durchführen und somit selbstständig erkennen, ob er vorschriftsmäßig verbunden wurde.

Tabelle 1 Inbetriebnahmealgorithmus des Wechselrichters

Transformatorübersetzung messen	Zeigerlängen (Spitzenwerte) vor und hinter dem Transformator messen. Berechnen, ob 70% eingestellt ist.	Wenn Bedingung erfüllt ist, dann weiter zum nächsten Schritt. Andernfalls Programm stoppen
Spannung im Zwischenkreis ermitteln	Die Spannung im Zwischenkreis Messen und Vergleichen ob dieser mit dem Gleichrichtwert einer B6 bei 230 V RMS übereinstimmt	Wenn Bedingung erfüllt ist, dann weiter zum nächsten Schritt. Andernfalls Programm.stoppen
Schütz mit definierten Widerständen zuschalten	Raumzeigermodulation Starten und maximal mögliche Ausgangsspannung mit $1/\sqrt{3}$ erzeugen. Dabei den Strom und den Drehwinkel messen.	Wenn Bedingung erfüllt ist, dann weiter zum nächsten Schritt. Andernfalls Programm stoppen
Auswerten	Sind alle drei Phasenströme im erwarteten Bereich und stimmt der Drehwinkel von	Wenn Bedingung erfüllt ist, über die

	Strom und Spannung überein ist die Überprüfung abgeschlossen.	Widerstände auf 0A ausregeln und direkte Netzverbindung herstellen.
--	---	---

3.4.1 Überprüfung des Übersetzungsverhältnisses am Trafo

Als erstes wird vom DSP das Übersetzungsverhältnis des Transformators ermittelt. Dazu wird ein Relay mit Funktion eines Umschalters angesteuert und vor den Transformator geschaltet. Genauer, es wird der Spannungsmesser aus der Phase W vor den Transformator in die Phase U geschaltet. Aus der Spannung vor dem Transformator und nach dem Transformator wird das Übersetzungsverhältnis des Transformators bestimmt.

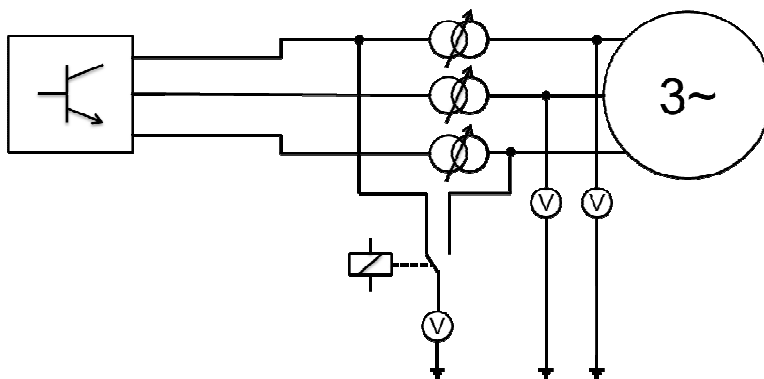


Abbildung 3-28 Voltmeterumschaltung zur Ermittlung der Transformatorübersetzung

Liegt das Übersetzungsverhältnis im Bereich von 69% bis 71% ist der Test bestanden und es wird zum nächsten Test übergegangen.

3.4.2 Verkabelungsüberprüfung und Messgerätetest

Grundgedanke ist, dass der Spannungszeiger am Trafo mit 70% Übersetzung eine Länge von 227,5 V hat²⁸. Der vom Wechselrichter maximal zu erzeugende Spannungszeiger ist 281,69 V lang. Es wird auf der Wechselrichterausgangsseite eine höhere Spannung erzeugt, um sicherzustellen, dass die Energieflussrichtung vom Wechselrichter in das Netz geht. Über die Widerständen (Glühlampen) kommt es zu einer Spannungsdifferenz. Diese treibt einen Strom voran, welcher vorher bekannt ist. Sind Phasen vertauscht, so sind diese um 120° zueinander versetzt und es kommt demzufolge zu einem größeren Spannungsabfall über dem Widerstand und somit zu einem erhöhten Stromfluss, welcher gemessen und ausgewertet werden kann. An dem Stromfluss kann erkannt werden, ob eventuell ein Verdrahtungsfehler vorliegt. Für die Widerstände sollen jeweils zwei in Reihe geschaltete 100 W 230 V Glühlampen pro Phase zum Einsatz kommen. Ein Widerstand aus Abbildung 3-29 ist also durch jeweils 2 dieser Glühlampen zu ersetzen, denn bei ver-

²⁸ Voraussetzung ist ein ideales Netz mit 230 V und 50 Hz ohne Oberwellen

tauschten Phasen entsteht ein Spannungsabfall mit einem Effektivwert von 312 V. Das sind 82 V mehr als die Nennspannung einer Glühlampe.

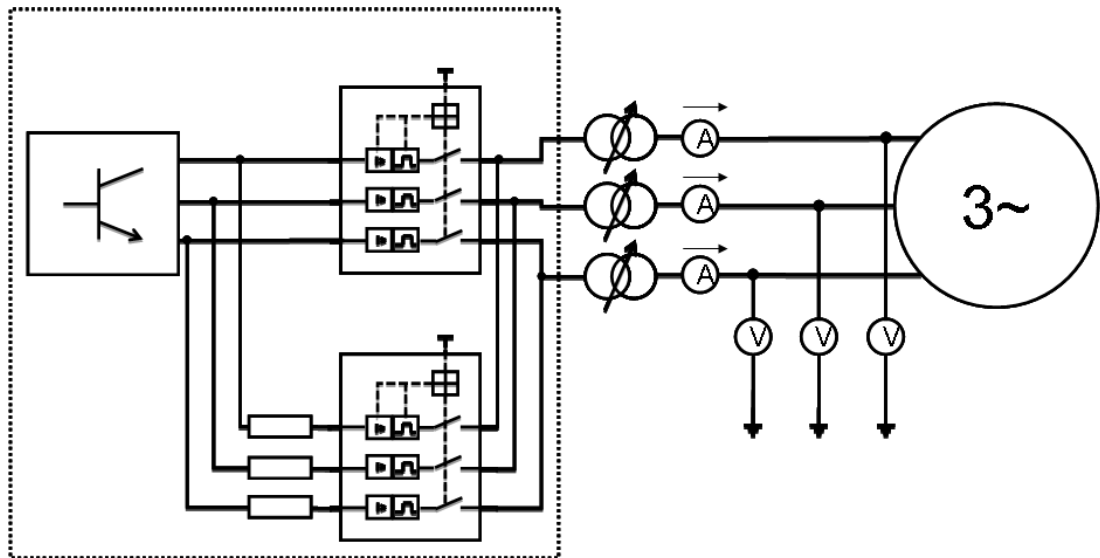


Abbildung 3-29 Anschlussübersicht des Wechselrichters zwischen Testbetrieb und Wechselrichterbetrieb

Bei korrekter Verdrahtung bekommt man für die Lampen einen Strom von ca. 170 mA bei einer Fehlverdrahtung 460 mA.

Der Selbsttest wird wie folgt verlaufen: Zunächst wird überprüft, ob alle Ströme innerhalb des Grenzbereichs von rund 170mA liegen. Ist dies der Fall wird im nächsten Schritt der Drehwinkel überprüft. Verläuft dieser gleich zum Spannungszeiger mit Abweichungen von weniger als 60°, so sind auch die Messgeräte richtig angeschlossen. Danach wird der Regler eingeschaltet und der Strom auf null ausgeregelt. Das Schütz für die direkte Verbindung des Wechselrichters mit dem Transformator wird geschlossen und das mit den Widerständen geöffnet.

3.4.2.1 Wechselrichterverdrahtung und Messwerterfassung fehlerfrei

Ist der Aufbau korrekt durchgeführt, wie auf dem unteren Bild zu sehen ist, und sind auch die Sensorkabel in der richtigen Reihenfolge angeschlossen, so speist der Wechselrichter auf allen drei Phasen synchron mit der Netzfrequenz und zugehöriger Phasenlage über die Widerstände in das Netz ein.

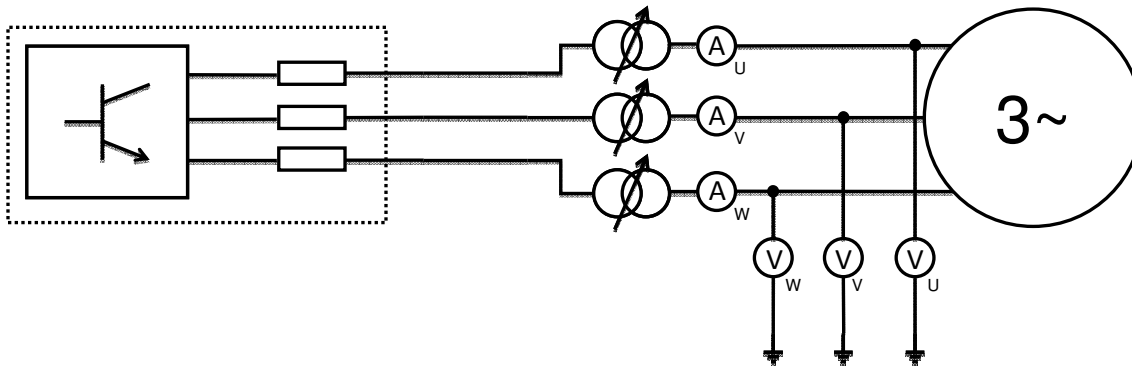


Abbildung 3-30 Schaltung für Verkabelungstest mit richtiger Verdrahtung

Die Widerstände - beziehungsweise im späteren Aufbau Glühlampen - begrenzen den Strom bei ungleichen Phasen. Über die Amperemeter kann der Wechselrichter feststellen, welche Phasen vertauscht worden sind.

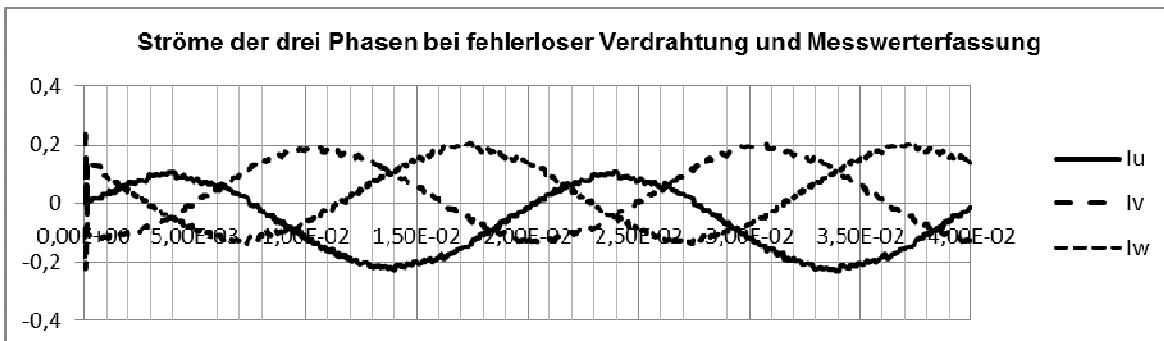


Abbildung 3-31 Ströme bei phasengleicher Einspeisung

Oben abgebildet sind die drei Phasenströme über einem Widerstand von 330Ω , welche alle bei ca. 170 mA liegen. Der enthaltene Gleichanteil ist simulationsbedingt noch mit auf die Kurven überlagert (keine Startwerte am Simulationanfang). Auch der Phasenwinkel des Stromes läuft leicht versetzt zum Phasenwinkel der Spannung, was sich durch den induktiven Anteil der Regelstrecke des Transformators erklären lässt.

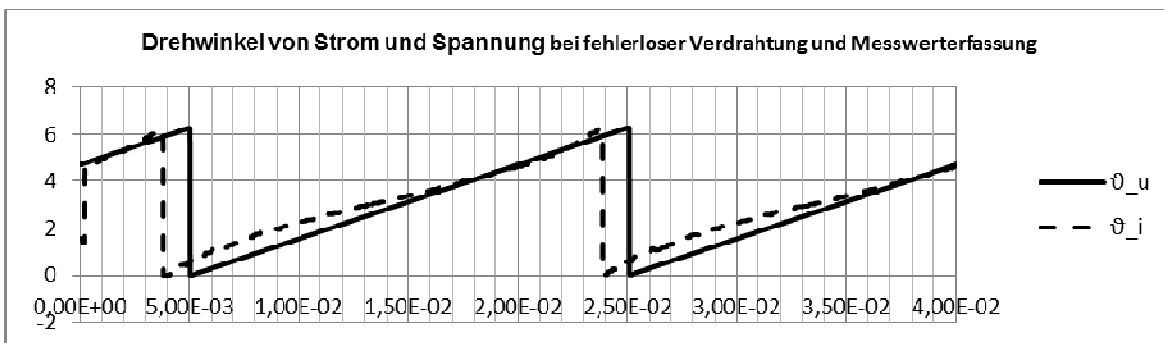


Abbildung 3-32 Drehwinkel von Strom und Spannung bei Phasengleichheit

3.4.2.2 Anschluss mit zwei verpolten Phasen

Werden zwei beliebige Phasen vertauscht treten Veränderungen zum einen in der Stromhöhe sowie des Phasenwinkels auf. Abbildung 3-35 zeigt, wie der Wechselrichter auf zwei Phasen vertauscht mit dem nachgebildeten Stelltransformator im Labor verbunden wurde.

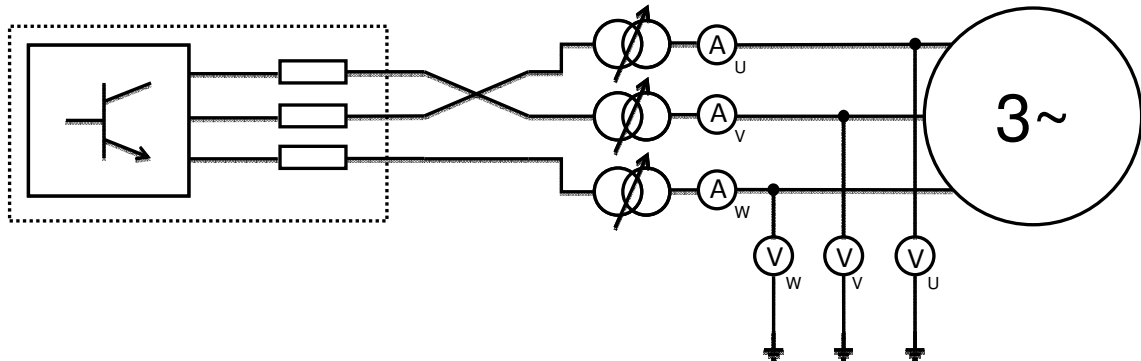


Abbildung 3-33 Schaltung mit zwei vertauschten Phasen

Gut zu erkennen ist der Stromanstieg in den beiden Phasen U und V bei 20 ms. In der Simulation wurde bei 20 ms eine Vertauschung der Phasen vorgenommen.

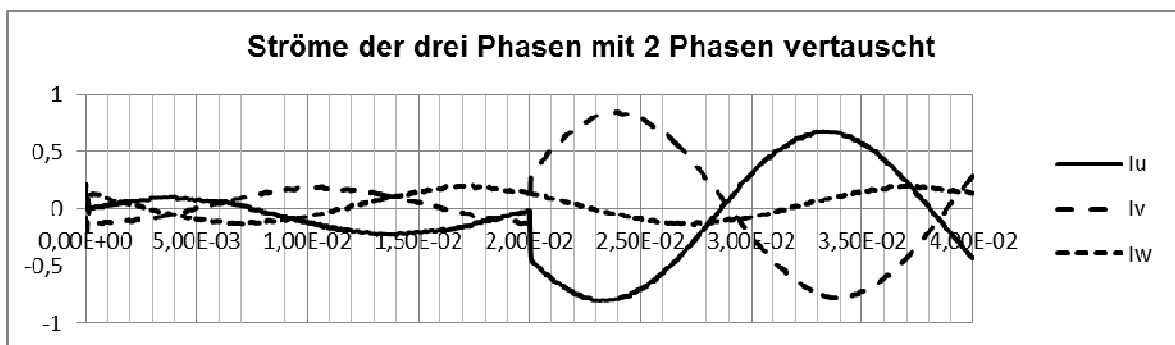


Abbildung 3-34 Ströme bei zwei vertauschten Phasen U und V ab 20 ms

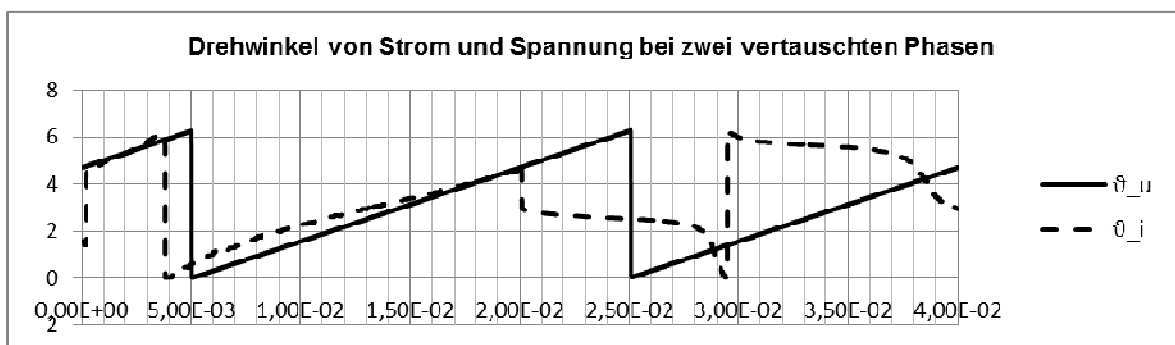


Abbildung 3-35 Drehwinkel von Strom und Spannung bei zwei vertauschten Phasen ab 20ms

Die Phase W weist in dem Beispiel keine Stromerhöhung auf und somit können später Hinweise auf die Fehlerquelle in einem Display angezeigt werden. Beim Drehwinkel erkennt man, dass dieser nach dem Umschalten seine Drehrichtung ändert. In der Simulati-

on wurde für dieses Beispiel noch eine zweiphasige Transformation verwendet. Da hier eine starke Abweichung der Ströme untereinander vorliegt wird der Effekt aus Kapitel 3.1 auch gut hervorgehoben.

3.4.2.3 Anschluss mit drei verpolten Phasen

Werden alle drei Phasen vertauscht treten auch Veränderungen zum einen in der Stromhöhe, als auch des Phasenwinkels auf. Abbildung 3-35 zeigt, wie der Wechselrichter auf drei Phasen vertauscht mit dem nachgebildeten Stelltransformator im Labor verbunden wurde.

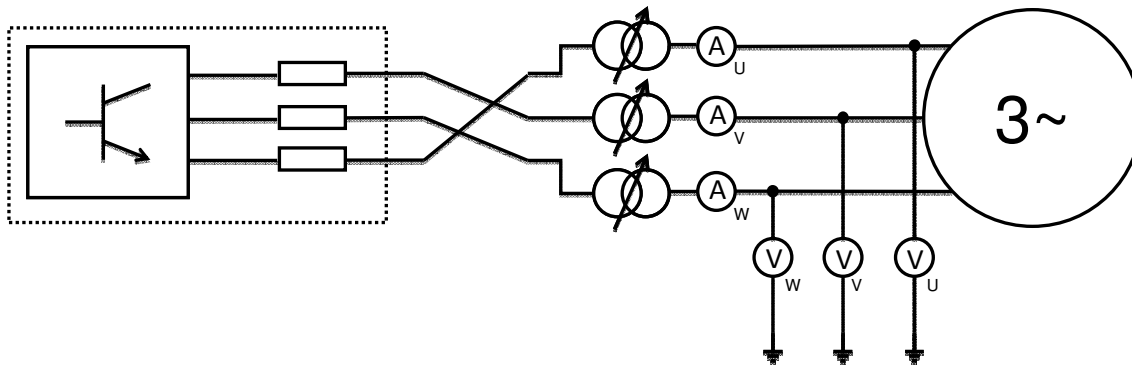


Abbildung 3-36 Schaltung mit drei vertauschten Phasen

Auch hier zeigt sich wieder die Umschaltung auf fehlerhafte Beschaltung bei 20ms mit einem Stromanstieg, diesmal in allen drei Phasen.

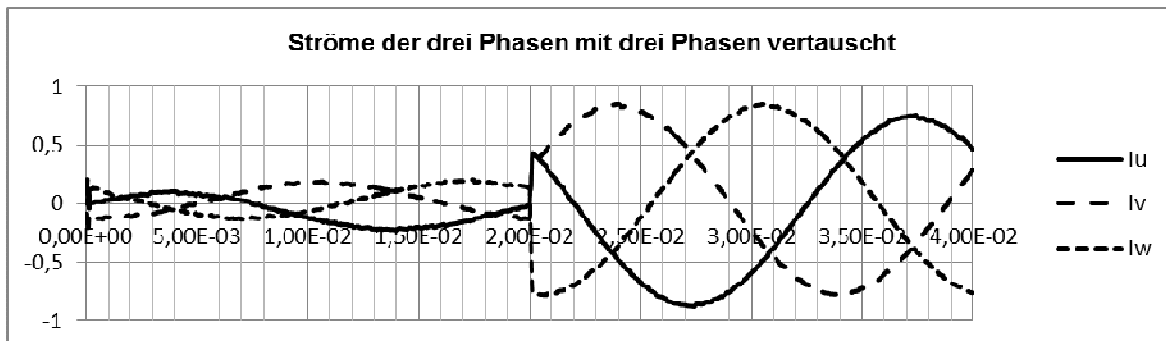


Abbildung 3-37 Ströme bei drei vertauschten Phasen ab 20ms

Das Drehfeld des Stromzeigers ändert diesmal nicht seine Richtung, aber es entsteht ein Phasenversatz von mehr als 90°. Je nach dem, wie die Phasen vertauscht werden kann dieser dem Spannungszeiger vor- oder nacheilen. In jedem Fall ist der erste Test, die Überprüfung der Stromhöhe, nicht bestanden.

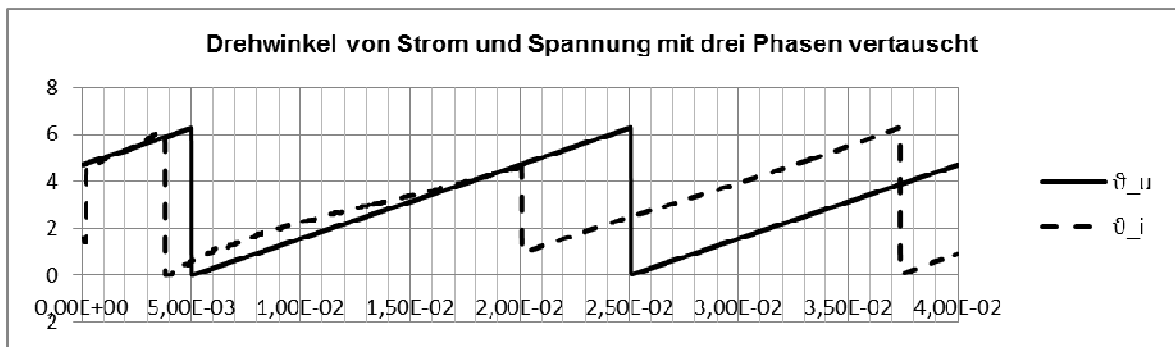


Abbildung 3-38 Drehwinkel von Strom und Spannung bei drei vertauschten Phasen ab 20ms

3.4.2.4 Zwei vertauschte Strommessgeräte

Die Spannungsmessgeräte werden als Bezugsbasis genommen und können beliebig vertauscht sein. Dreht der Spannungszeiger von 0 bis 2π gibt es keinen Fehler. Der Stromzeiger muss dem Spannungszeiger in richtiger Richtung folgen.

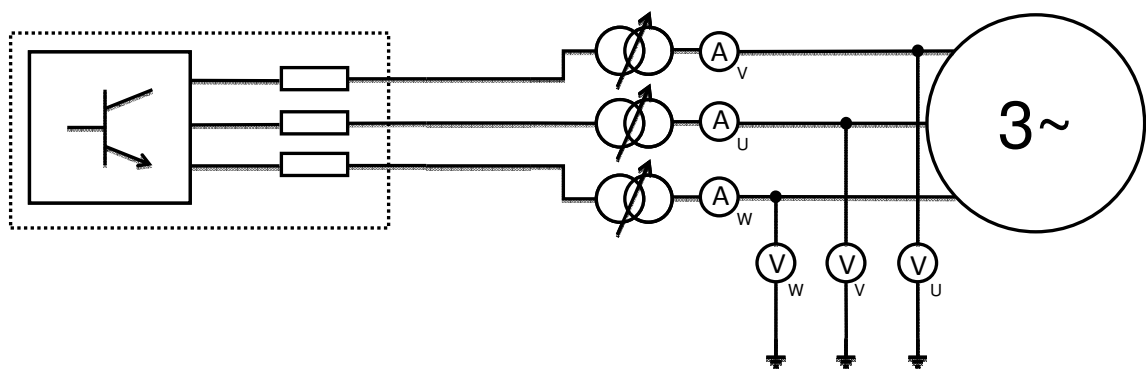


Abbildung 3-39 Schaltung mit zwei vertauschten Strommessgeräten

Im Bild sind die Strommessgeräte V und U vertauscht. Weil der Anschluss an den Transformator richtig durchgeführt wurde sind die einzelnen Leiterströme im vorgegebenen Limit (Abbildung 3-40).

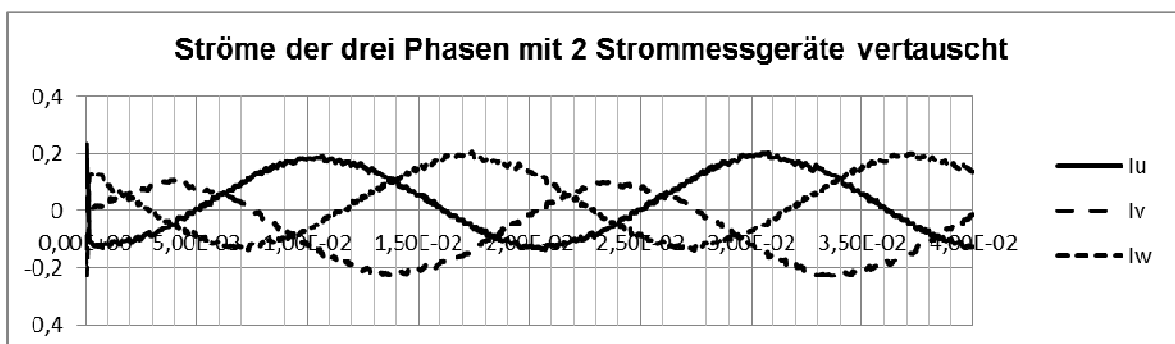


Abbildung 3-40 Ströme bei Vertauschung von zwei Strommessgeräten

Der Drehzeiger des Stromes dreht jetzt in die andere Richtung und ist wieder stark zum Spannungsdrehzeiger versetzt. Eine Meldung könnte an einem eventuellen Display ausgegeben werden.

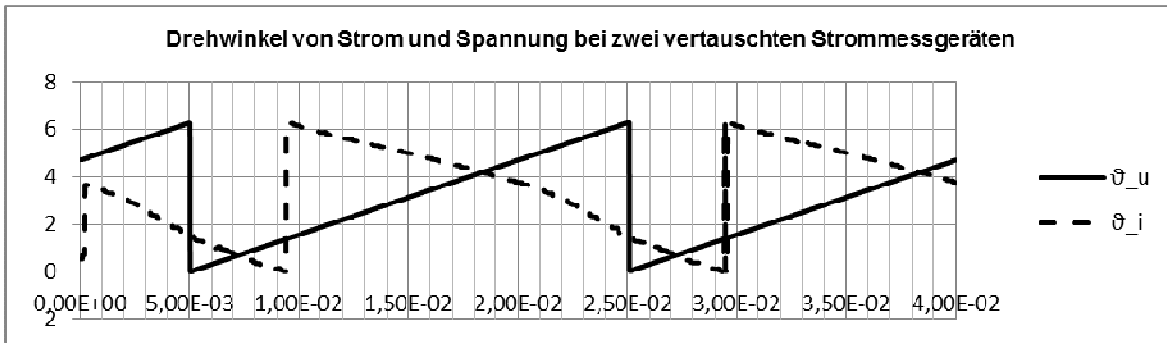


Abbildung 3-41 Drehwinkel von Strom und Spannung mit zwei vertauschten Strommessgeräten

Softwaretechnik würde dies zwar kein Problem darstellen, weil der Winkel korrigiert werden könnte. Für Test- und Ausbildungszwecke ist das allerdings nicht vorgesehen, weil hier ein korrekter Testaufbau erzwungen werden soll, bei dem eine Korrektur in Software nicht vorgesehen ist.

3.4.2.5 Drei vertauschte Strommessgeräte

Zuletzt noch die Variante, es wurden alle drei Stromsensoren verkehrt am A/D-Wandler angeschlossen. Die gemessenen Ströme sind hier, wie zu erwarten, auch wieder im vorher bestimmten Bereich. Diesmal dreht der Stromzeiger in die gleiche Richtung wie der Spannungszeiger aber anhand des Phasenversatzes kann der fehlerhafte Anschluss detektiert werden.

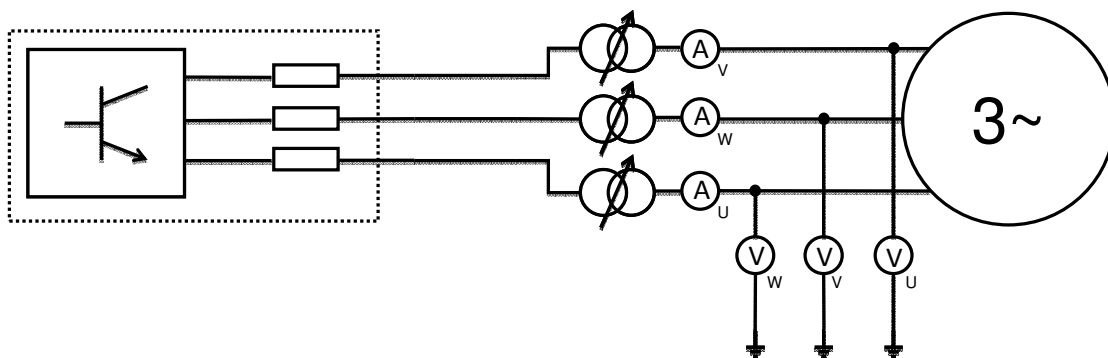


Abbildung 3-42 Schaltung mit drei vertauschten Strommessgeräten

Nach Erreichen des Maximalwertes von 2π setzt die Programmierung die Winkel wieder auf null zurück. Von der Spannung wird der Drehwinkel wie im Bild Abbildung 3-44 bei 5 ms und bei 25 ms auf null zurückgesetzt und der des Stromes bei 9,5 ms und 29,5 ms. In beiden Fällen ergibt sich eine Differenz von 5 ms und somit eine Abweichung von 81° . Sind in einem Netzwerk nur ohm'sche Anteile enthalten, so ergibt sich unter idealen Bedingungen eine Abweichung von 120° . Dies kann sehr leicht überprüft werden.

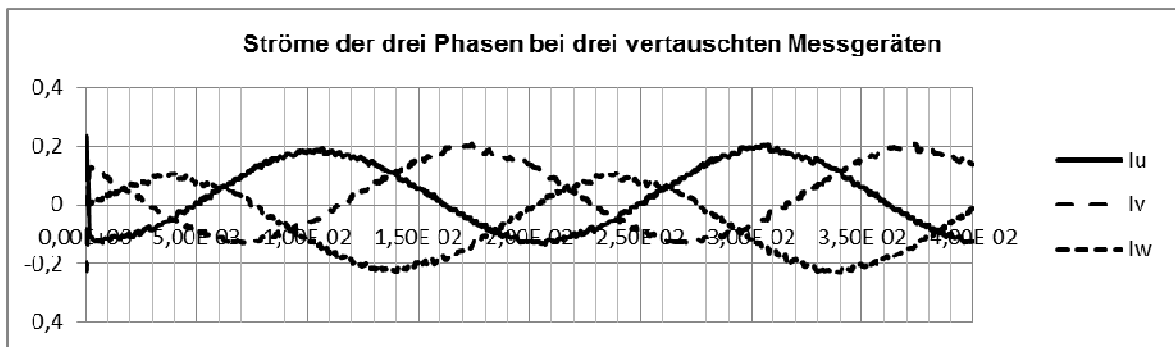


Abbildung 3-43 Ströme wenn drei Strommessgeräte vertauscht sind

Unter realistischen Bedingungen haben Blindelemente einen Einfluss auf den Phasenwinkel des Stromes. Es muss somit ein Bereich festgelegt werden, indem ein Fehler definiert wird. Im fehlerfreien Fall ist laut der Simulation mit einer Phasenverschiebung von $360^\circ \cdot (25,1 \text{ ms} - 23,9 \text{ ms}) / (20 \text{ ms}) = 21,6^\circ$ zu rechnen. Sind alle drei Strommessgeräte gegenüber den Spannungsmessgeräten vertauscht und es wird nur Blindleistung eingespeißt kann eine Phasenverschiebung von 210° ²⁹ oder 30° ³⁰ auftreten. Für den ersten Wert ist eine Aussage sicher zu treffen. Bei 30° kann allerdings auch eine normale Abweichung durch die Blindelemente des Transformators vorliegen. Es wird angenommen, dass die Wirkleistung durch die verwendeten Widerstände größer ist als die auftretenden Blindleistungen. Mit einer Phasenverschiebung von 90° sollte nicht zu rechnen sein. Die maximal höchste Verschiebung wird an dieser Stelle mit 60° angenommen. Demzufolge muss ein Fehler ab einer Phasenverschiebung von 60° bis 210° und mehr angenommen werden.

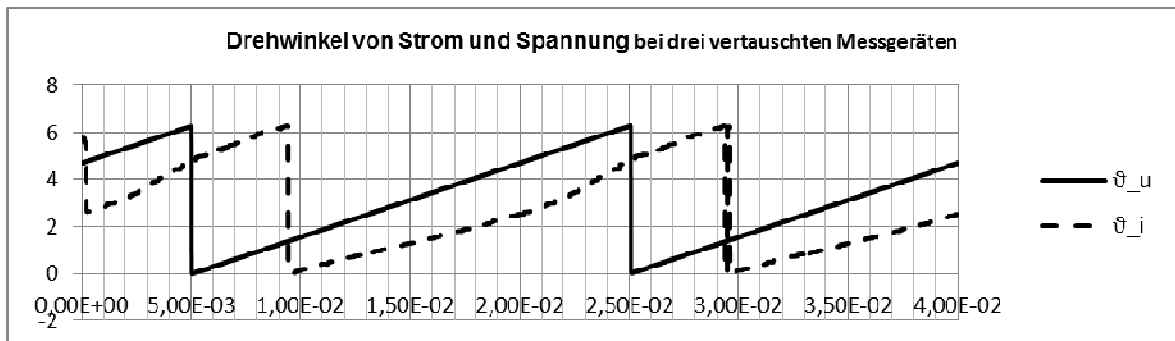


Abbildung 3-44 Drehwinkel von Strom und Spannung mit drei vertauschten Strommessgeräten

3.5 Zusammenfassung

Das erarbeitete Simulationsmodell ist allen Anforderungen gerecht geworden. Die Fragestellung, ob auch eine vereinfachte Transformation, wie sie unter anderem bei elektrischen Maschinen verwendet wird, eingesetzt werden kann, ist mit einem negativen Ergebnis zu beantworten. Eine vollständige Koordinatentransformation sowie das Erfassen

²⁹ $120^\circ + 90^\circ = 210^\circ$

³⁰ $120^\circ - 90^\circ = 30^\circ$

aller drei Phasen kann für spätere Analysen im Bereich der Oberwellen nicht von Nachteil sein. Die in Kapitel 2 erarbeiteten Parameter für das zu regelnde System sowie die Reglerverstärkungen konnten erfolgreich mit dem Simulationsmodell getestet werden. Das erarbeitete Bode-Diagramm stimmt mit den erhaltenen Werten aus der Simulation gut überein. Auch wurde ein Konzept zur Inbetriebnahme des Wechselrichters erarbeitet und in Simulation auf Funktionalität getestet. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf einer Selbstdiagnose zum Feststellen eines korrekten Anschlusses des Wechselrichters an die Phasen des Wechselstromnetzes sowie des richtigen Anschlusses der Messgeräte an den DSP. Beim Erarbeiten des Inbetriebnahmekonzeptes ist außerdem die Forderung aufgetreten, dass eine Erweiterung der Hardware nötig ist.

speisenden Netzes, im Fall der Abbildung wird dafür die Phase W verwendet. Beide Messgeräte laufen in einen Kontrollblock hinein. Dieser wird nur zum Starten des Wechselrichters einmal ausgeführt und nach dessen Abarbeitung wird das zweite Voltmeter wieder hinter den Transformator geschaltet. Der erste Block errechnet das Übersetzungsverhältnis des Transformators sowie die Länge, also den Spitzenwert des vor dem Transformator anliegenden Raumzeigers. Beide Werte ermittelt das Programm einmalig und sie bleiben während der gesamten Programmlaufzeit erhalten. Der darunter liegende Block ermittelt aus den drei Phasen der Netzspannung durch die Clarke-Transformation die Alpha- und Beta-Werte der Netzspannung sowie den Drehwinkel des Spannungsraumzeigers des Netzes. Mit den Stromwerten wird äquivalent verfahren. Der hier entstehende Drehwinkel des Stromes wird momentan noch nicht ausgewertet. Die entstehenden Werte werden an die Park-Transformation weitergegeben. Es entstehen die zu regelnden Größen. Darüber hinaus wird nicht die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ermittelt. Von der Park-Transformation geht es direkt in den PI-Regler. Er stellt anhand der ermittelten Regelparameter den neuen Stellwert ein. Zuletzt vereinigen sich alle berechneten Größen, ob mittelbar oder unmittelbar im Block „Normierung“. Die Raumzeigermodulation fordert eine Formeinhaltung der Eingabewerte im Bereich von $[-1;1]$, welche hier vorgenommen und normiert wird. Die Werte setzen sich aus dem Spannungszeiger vor dem Transformator sowie denen aus der Regelung zusammen. Danach beginnt der Zyklus von neuem, jedoch ohne den zuerst genannten Block.

4.2 DSP

Die Softwareentwicklung wird auf den Digitalen Signal Prozessor (DSP) von *Analog Devices Balckfin ADSP BF537* zugeschnitten. Es handelt sich dabei um einen 32-Bit-Prozessor mit einer Ganzzahlarithmetik. Deren Verwendung erfordert besondere Verfahren, um die berechneten Ergebnisse wieder anzupassen. Im Folgenden werden die Umrechnungsfaktoren sowie die benötigte Zahlenanpassung und Rechenarithmetik erläutert.

4.2.1 Überblick der Integer-Variablenbereiche im DSP

Der DSP verwendet standardmäßig 32 Bit zum Abspeichern einer Variablen. Zur Erfassung der Eingangswerte aus dem A/D-Wandler werden dazu die letzten 16 Bit verwendet. Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Wertebereiche der verwendeten Integer-Variablen.

Tabelle 2 Eingangsdaten vom A/D-Wandler

		Auflösung
Strom	-20 A ... 20 A entspricht -3276 ... 3275	$\pm 6,1$ mA
Spannung Netz	-500 V ... 500 V entspricht -32768 ... 32767	$\pm 15,259$ mV
Spannung Zwischenkreis	-1500 V ... 1500 V entspricht -32768 ...	$\pm 45,778$ mV

	32767	
Sinustabelle	-1 ... 1 entspricht -32768 ... 32767	
Definierte Konstanten	Dezimalzahl mit $2^{14} = 16384$ multipliziert	

Wenn keine der verwendeten Zahlen bei einer Multiplikation größer als 46340 ist, kann dies nicht zu einem Überlaufen des 32-Bit-Registers führen. Bei größeren Zahlen werden 64 Bit benutzt.

Der A/D-Wandler liefert für unterschiedliche physikalische Eingangsgrößen identische Wandlungswerte. Eine Anpassung der Eingangsgrößen an die physikalischen Größen muss erfolgen. Im DSP sollen alle Werte als Integer dargestellt werden. Es wird eine Festkommaarithmetik mit dem Qn.m Zahlenformat verwendet, wobei n angibt, wie viele Bits für die Stellen vor dem Komma und m für die Stellen nach dem Komma verwendet werden. Zur Darstellung der Zahlen werden von den 32-Bit-Registern ebenfalls die letzten 16 Bit verwendet. Die beiden Werte n und m berechnen sich dann wie folgt:

$$n = \left\lceil \frac{\ln(\text{Wandlerbereich}_{\text{real}})}{\ln(2)} \right\rceil \quad \text{F(4.49)}$$

$$m = 16 - n$$

Für die Zwischenkreisspannung wird der real abzudeckende Spannungsbereich gewählt. Dieser ergibt für die verwendeten Spannungswandler von -1500 V bis 1500 V einen abzudeckenden Bereich von 3000 V und entspricht dem Wandlerbereich_{real}. Eingesetzt in obige Formel ergibt sich für n gleich 12 und für m gleich 4, was das Zahlenformat Q12.4 ergibt. Im Zahlenformat Q12.4 entspricht eine 32767 jedoch nicht 1500 V sondern $2^{12} / 2 - 1$ V und somit ungefähr 4096 V. Das vom A/D-Wandler gewandelte Ergebnis muss demzufolge auf die 1500 V angepasst werden.

$$\text{Korrekturfaktor} = \frac{\text{Maximalwert}_{\text{ADwandler}}}{\text{Maximalwert}_{\text{Spannung}} \cdot 2^m} \quad \text{F(4.50)}$$

$$\text{Korrekturfaktor} = \frac{32767}{1500 \cdot 2^4} = 1,36529167$$

Wichtig ist, dass der Maximalwert_{ADwandler} im Zweierkomplement angegeben wird. Nun wird der Korrekturfaktor nach der Formel F(4.50) in ein passendes Zahlenformat umgewandelt, in dem er mit zwei multipliziert wird, da die Abbildung der Zahl im Zweierkomplement erfolgt. Das Ergebnis lautet dann 22368 im Format Q2.14. Der vom D/A-Wandler gewandelte Wert wird durch den Korrekturfaktor geteilt und in das passende Format Q12.4 geschoben. Nachfolgende Tabelle zeigt alle Korrekturfaktoren der gewandelten Werte.

Tabelle 3 Korrekturfaktoren für die gewandelten Werte

Korrekturfaktor	Wert	Format
-----------------	------	--------

Strom	2621	Q1.15
Spannung Netz	16776	Q2.14
Spannung Zwischenkreis	22369	Q2.14

Die Zahlenformate mit ihrem maximal positiven Wert im DSP sind in Tabelle 4 zu finden.

Tabelle 4 Zahlenformate der gewandelten Werte

Korrekturfaktor	Maximaler Wert	Format
Strom	20480	Q5.11
Spannung Netz	32000	Q10.6
Spannung Zwischenkreis	24000	Q12.4

4.2.2 Grundfunktionen arithmetik.c

Wie aus Kapitel 4.2.1 hervorgeht, müssen bei bestimmten Rechenoperationen Korrekturen durchgeführt werden. Als Beispiel sei hier die Division der Netzspannung mit einer Konstanten aufgeführt. Dabei wird das nicht korrigierte Ergebnis der A/D-Wandlung verwendet um das Prinzip zu erläutern. $500 \text{ V} / \sqrt{3} = 288.675 \text{ V}$. Im DSP würde folgendes berechnet werden: $32767 / 28378^{31} = 18,918$ Weil hier Integer-Variablen verwendet werden lautet das Endergebnis 18 und demzufolge 274,667 mV. Es muss also eine Korrektur vorgenommen werden. Es ist bekannt, dass die Konstante mit 2^{14} multipliziert wurde, also im Format Q2.14 vorliegt. Wird dies auch auf den Dividenten angewendet, erhält man das korrekte Ergebnis zurück. $32767 * 16384^{32} / 28378 = 18917,983$ und wird als 18917 im Register abgespeichert. Als Resultat erhält man 288,659V. Soll das Ergebnis genauer sein, so muss in der Funktion divi16() noch gerundet werden. Im Moment ist dieser Zusatz nicht enthalten. Im Folgenden werden die Funktionen dieser Funktionsbibliothek vorgestellt.

4.2.2.1 fxpunktkonversion()

Diese Funktion konvertiert eine Zahl von einem Zahlenformat in ein anderes und gibt die Zahl im neuen Zahlenformat wieder zurück. Als Übergabeparameter wird die Zahl als 32-Bit-Integer übergeben. Die Summe von $n + m$ muss 16 ergeben. Die zweite Angabe ist m

³¹ Wurzel 3 mit 2^{14} multipliziert und auf eine Ganzzahl gerundet

³² 2^{14} ausgerechnet

aus dem Format der übergebenen Zahl und die dritte Angabe m aus dem gewünschten Zahlenformat.

Sollte es bei der Multiplikation zu Überläufen kommen, kann einer der Multiplikatoren oder beide in einen sicheren Zahlenbereich verschoben werden ohne zu viele Nachkommastellen verlieren zu müssen.

4.2.2.2 *mul16()*

Werden zwei Festkommazahlen miteinander multipliziert, so muss nach der Multiplikation das Ergebnis im Zahlenformat korrigiert werden. Zwei verschiedene Zahlenformate in 16-Bit ergeben ein Zahlenformat in 32-Bit und müssen wieder in ein 16-Bit-Format gewandelt werden. Eine Überlaufüberprüfung wird nicht vorgenommen und es ist bei der Nutzung dieser Funktion darauf zu achten, dass keine der beiden Zahlen größer als 46340 ist. Mit der Funktion `fixpunktkonversion()` kann die Funktion `mul16()` mit einer Eingabewerteüberprüfung erweitert werden. Die ersten beiden Eingabewerte sind die zu multiplizierenden Zahlen und der dritte Wert ist die Umwandlung zurück in eine 16-Bit-Zahl. Dabei ist nicht das gewünschte Format anzugeben, sondern um wie viel die Zahl vom 32-Bit-Format, welches sich bei der Multiplikation ergibt, umgewandelt werden soll. In den meisten Fällen wird hier vom zweiten Multiplikator das m angegeben und das erhaltene Ergebnis liegt im Zahlenformat vom ersten Multiplikator vor.

4.2.2.3 *divi16()*

Beim Dividieren muss der Dividend um mindestens m Stellen des Divisors vor der Division nach links verschoben werden, andernfalls ist mit einem Informationsverlust zu rechnen. Das erhaltene Ergebnis ist wieder im Format des Dividenten. Eine Division durch 0 wird verhindert, indem eine 0 mit einer 1 ausgetauscht wird. In dem Fall liefert die Funktion den Wert des Dividenten, nach links geschoben um m Bit zurück. Ab spätestens hier liegt keine 16-Bit-Zahl mehr vor. Bei Weiterverwendung dieser Daten muss eine Anpassung erfolgen. In dieser Arbeit tritt der Fall einer Division durch 0 nicht auf und wurde nicht weiter behandelt.

4.2.2.4 *zweierkomplement32()*

Die eingegebene Integer wird als Zweierkomplement wieder zurückgegeben. Es müssen keine weiteren Besonderheiten beachtet werden.

4.3 Hauptfunktionsbausteine

An dieser Stelle werden die Hauptfunktionsbausteine für den Wechselrichterbetrieb beschrieben. Wichtig hierfür sind die Clarke- und Park-Transformation, die Regelung sowie die Inbetriebnahme. Die Auswertung der A/D-gewandelten Werte sowie deren Anpassung und die Übergabe der zur Berechnung benötigten Variablen wird nicht erwähnt und ist nur über den Anhang des kommentierten Quelltextes verfügbar.

4.3.1 Funktionsbaustein clarktransformation.c

Für die Transformation sind die beiden Formeln F(1.3) und F(1.4) in jeweils einer eigenen Funktion in Verwendung. Die Formel F(1.6) wird in beiden zur Winkelberechnung genutzt. Für diese und nachfolgende Funktionen wurde mit Zeigern auf Strukturen gearbeitet. Eine Struktur kann mehrere Variable beinhalten und gliedert sie sinnvoll zusammen. Die erste Struktur enthält die Eingangsvariablen von beispielsweise der Spannungen der Phasen U, V und W und die zweite Struktur für die Ausgangswerte enthält Alpha, Beta und Theta. Weiterhin sind die Strukturen als globale Variablen definiert, sie sind somit zu jeder Zeit von jedem Unterprogramm abrufbar. Bei der Berechnung müssen mehrere Variable von der Unterfunktion verändert werden. Unter Nutzung eines Returnwertes kann aber jeweils nur eine Variable verändert werden. Die Funktion könnte allerdings direkt auf die globalen Variablen zugreifen und diese verändern. Dies hat aber zur Folge, dass für Strom- und Spannungswerte eine eigene Funktion angelegt werden müsste. Durch die Übergabe eines Zeigers auf eine Struktur kann bestimmt werden, welche Werte verändert werden sollen. Der Funktionsaufruf bedarf demzufolge nur die Adressen der Strukturen und auf den jeweiligen Adresswerten werden die berechneten Werte abgespeichert. Einen Rückgabewert haben die Funktionen nicht.

Die Transformationsberechnungen mit der Formel F(1.3) sind für die Nutzung des Wechselrichters in Verbindung mit einem symmetrischen Verbraucher, wie einer Asynchronmaschine vorgesehen. Dagegen wird die Formel F(1.4) für den Betrieb mit unsymmetrischen Lasten, wie beispielsweise ein Energienetz, gewählt.

4.3.2 Funktionsbaustein parktransformation.c

Die Park-transformation ist in zwei Variationen programmiert worden. Die erste Variante stellt eine vereinfachte Form für die Nutzung symmetrischer Verbraucher, wie beispielsweise Asynchronmaschinen dar und ist nicht für die Netzeinspeisung zu verwenden. Vor Verwendung der beiden Funktionen „park_symmetrisch(*,*)“ und „invers_park_symmetrisch(*,*)“ muss die korrekte Arbeitsweise validiert werden. Für die vorliegende Arbeit war dies nicht notwendig.

Auch für die vollständige Park-Transformation ist jeweils eine Funktion für die Hin- und Rücktransformation mit Formel F(1.7) bzw. F(1.7) programmiert worden. Vollständige und vereinfachte Transformation sind vom Funktionsaufbau ähnlich zu benutzen. Beide orientieren sich am Prinzip der Clarke-Transformation - auch wieder im Hinblick auf eine mögliche Nutzung dieser Funktion für die verschiedenen Oberwellen. Nachfolgend ein kleines Programmbeispiel für die spätere Anwendung zur Kompensation von Oberwellen:

```
struct eingabe {int var1; int var2; ... };
struct ausgabe {int rav1; int rav2; ... };
```

```
struct eingabe array_in[3]; /*ein Array von 50 Eingabewerten*/
struct ausgabe array_out[3]; /*ein Array von 50 Ausgabewerten*/
```

```

int i;
for(i=0; i<3, i++) {
    park_unsymmetrie(&array_in[i], &array_out[i]);
}

```

Anhand dieses kleinen Funktionsbeispiels ist ersichtlich wie einfach die Funktion mittels unterschiedlichster Parameter aufgerufen werden kann. Damit könnte jetzt die Park-transformierte der Grundschiwingung sowie die ersten beiden harmonischen Schwingungen berechnet werden. Das Array „array_in[3]“ beinhaltet drei Strukturen vom Typ „eingabe“, was im konkreten Beispiel die Clarke-transformierten der Strangströme sind und „array_out[3]“ die dazugehörigen Park-transformierten werden. Übergeben werden der Funktion die Adressen der Strukturen, auf welche die Arrays zeigen.

Die inverse Parktransformation wird aufgerufen durch die Funktion „invers_park_unsymmetrie(int , int, *, *)“. Die ersten zwei Integer sind gleichgrößen, für gewöhnlich die nach der Regelung. Danach wird die Systemparameterstruktur als Ziel für das Abspeichern der geregelten Werte angegeben der letzte Zeiger ist für die Übergabe eines Winkels vorgesehen. In der Vorliegenden Arbeit wird dort Theta aus der Clarke-Transformation der Netzspannungen verwendet.

4.3.3 Funktionsbaustein PID_Regler.c

Auch der Regler arbeitet wieder mit Strukturvariablen. Während die Funktionen der Clarke- und Park-Transformationen mit den im Programm definierten Konstanten arbeiten und sich selbst wieder auf das Eingabeformat korrigieren, muss für die zu regelnde Größe das Format mitgeteilt werden. Zunächst einmal wird davon ausgegangen, dass die Ströme alle im selben Format vorliegen. Die Funktion wurde daher für die Übergabe von zwei Parametern konzipiert. Der Funktionsaufruf unterscheidet sich von den zwei vorhergehenden Funktionen in der Übergabe der Parameter. Zuerst erwartet die Funktion „PID_regler(*, int)“ eine Adresse auf die Struktur für den Regler und als zweites eine Integervariable für die Nachkommastellen *m* des Festkommazahlenformats Qn.m. Für die Berechnung der Reglerausgangswerte werden einige Größen benötigt. In Folgenden die Strukturvariable des Reglers.

```

1.      struct _stPID_Regler {
2.          int e_k_minus_1;
3.          int p_anteil;
4.          int i_anteil;
5.          int d_anteil;
6.          int abtastzeit;
7.          int kp;
8.          int ki;
9.          int kd;
10.         int sollwert;
11.         int istwert;

```

```

12.          int stellwert;
13.          int modus;
14.          };

```

Zeile 2. ist die Reglerabweichung aus dem vorherigen Regelschritt, muss beim Initialisieren eine Null zugewiesen bekommen und wird für die Berechnungen des Differentialanteils sowie des Integralanteils dringend benötigt. Zeile 3. bis 5. sind die errechneten einzelnen Anteile der Regler. Sie könnten auch in der Funktion als temporäre Variablen eingebunden werden. Dadurch kann die Struktur verkleinert werden. Die Abtastzeit in Zeile 6. wird bei 10 kHz Pulsfrequenz mit 100 µs vorgegeben, denn die Abtastfrequenz entspricht hier der Pulsfrequenz. Sie ist im Format Q38.24 anzugeben. Die einzelnen Verstärkungen der Regler werden unter 7. bis 9. angegeben. Vorteilhaft ist, dass für unterschiedliche Oberwellen unterschiedliche Verstärkungen gewählt werden können. Dies hat zur Folge, dass Oberwellen unterschiedlich schnell und stark kompensiert werden können. Es werden dann für jede Struktur jeweils wieder drei Integer-Speicherplätze im RAM belegt. Optional kann auf eine einheitliche Verstärkung mit globalen Variablen zurückgegriffen und somit die Struktur verkleinert werden. Das Programm ist daraufhin anzupassen. Der Sollwert in Zeile 10. kann über eine andere Funktion zugewiesen werden.³³ Äquivalent verhält es sich mit dem Istwert aus Zeile 11. Nach der AD-Wandlung und Berechnung wird dieser von einer Funktion zugewiesen. Der Stellwert in Zeile 12. wird vom Regler berechnet und sollte für die Alpha- und Beta-Berechnung der Raumzeigermodulation genutzt werden. Der Modus unter 13. gibt an, welcher Regelalgorithmus verwendet werden soll. Mit diesem Wert verhält es sich wie mit denen unter Zeile 3. bis 5. sowie 7. bis 9. Möchte man auf einen einheitlichen Regler für alle Oberwellen zurückgreifen kann hier auch eine Programmbänderung vorgenommen werden. Zur Auswahl stehen drei Modifikationen, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5 Reglerauswahlmöglichkeiten des PID-Reglerprogramms

P	PI	PID
1	2	3

4.3.4 Funktionsbaustein inbetriebnahme.c

Die Bibliotheksdatei inbetriebnahme.c besteht aus mehreren Unterfunktionen. Alle haben gemeinsam, dass auch sie auf eine globale Strukturvariable zurückgreifen. Unten ist die Struktur der Systemparameter aufgeführt.

```

1.          struct _stSystemParameter {
2.              int uebersetzungsverhaeltniss;
3.              int netzzeiger;
4.              int trafozeiger;
5.              int zwischenkreisspannung;

```

³³ Dazu zählt beispielsweise das Auslesen eines Potentiometers und das Abspeichern des Sollwertes auf der Position. Die Variable bleibt dann für den Regler erhalten.


```

6.          int teststrom_RMS_U;
7.          int teststrom_RMS_V;
8.          int teststrom_RMS_W;
9.          int regler_alpha
10.         int regler_beta;
11.         int rzm_alpha;
12         int rzm_beta;};

```

Die Strukturvariable wird für die Inbetriebnahme, die Regelung sowie die Normierung benötigt. Die Inbetriebnahmefunktion speichert das Übersetzungsverhältnis vom Stelltransformator, die Spannungszeiger vom Netz und vor dem Stelltransformator sowie die Effektivwerte der drei Leiterströme durch die Widerstände dauerhaft ab. Die Variablen `regler_alpha` und `regler_beta` bilden sich aus der Parkrücktransformierten der Reglerstellwerte. Die Funktion für die Raumzeigermodulation bedient sich den Werten `rzm_alpha` und `rzm_beta`. Die zwei Regler-Variablen können mit beliebigen Funktionen verändert werden.

Zunächst wird also die Transformatorübersetzung bestimmt. Im Programm muss dazu zunächst ein digitaler Ausgang geschaltet werden, womit ein Relais angesteuert und ein Spannungsmessgerät vor den Transformator geschaltet wird. Zur Orientierung des Gedankengangs sei noch einmal auf Abbildung 3-28 in Kapitel 3.4.1 verwiesen.

Der programmierte Algorithmus zum Ermitteln der Übersetzung funktioniert folgendermaßen: Es werden 25 gleichgerichtete Halbperioden abgetastet, Startwert ist dabei immer von 0 mit nachfolgendem Wert größer 0. Wird ein Wert kleiner als der Vorgängerwert so wird angenommen, dass es sich hierbei um den Scheitelpunkt der Sinusfunktion handeln muss und er wird gespeichert. Das beschriebene Verfahren wird für Werte vor dem Transformator und analog dazu hinter dem Transformator angewendet. Nach 25 Messwerten schließt der Algorithmus ab und geht weiter zur Berechnung des arithmetischen Mittelwertes für beide Messreihen. Das Verhältnis aus Transformatorspannung und Netzspannung wird gebildet und in die Strukturvariable in Zeile 2 eingetragen. Auch beide Spannungszeiger werden in der Struktur unter 3 und 4 abgespeichert. Momentan werden sie für keine weiteren Berechnungen mehr verwendet. Liegt ein Messfehler vor bricht die Funktion selbstständig beim Überschreiten einer Laufvariable ab und gibt eine -1 zurück.

Der von der Funktion ermittelte Rückgabewert wird nun ausgewertet. Er darf nicht -1 sein und muss im Bereich von 69% bis 71% liegen. Die derzeitige Fehlerbehandlung wird durch eine Endlosschleife ohne Ausgang und weitere Funktion realisiert. Später könnte der Fehler auf einem Display ausgegeben und eine Option zum Verlassen der Endlosschleife programmiert werden. Wird kein Fehler festgestellt muss das Messgerät wieder auf die Netzseite verschaltet werden. Dies wird automatisch mittels eines Relais (`*pPORTFIO_CLEAR = RELAI3`) vorgenommen.

War der Wechselrichter von Beginn an eingeschaltet, so sollte die Zwischenkreisspannung in der Zwischenzeit den Gleichrichtwert einer B6 angenommen haben. Hierfür werden 10 Messwerte aufgenommen, der arithmetische Mittelwert gebildet und in der Struktur unter 5 abgespeichert. Auch diese Funktion gibt bei Zeitüberschreitung eine -1 zurück. Der

Rückgabewert kann wieder durch eine Fehlerbehandlung ausgewertet werden. Hier wird auch das zuvor verwendete Prinzip angewandt.

Die letzte Teilfunktion ist schwieriger in ihrer Abhandlung, denn sie benötigt das Modul für die Raumzeigermodulation aus der bereits bestehenden Programmbibliothek. Ist die Raumzeigermodulation einmal gestartet, so darf sie im Programmablauf nicht mehr gestoppt werden, es sei denn der Leistungsteil des Wechselrichters ist vollständig vom Netz getrennt oder die Freigabe über den Schalter blockiert. Wird das Programm angehalten, so bleiben die Transistoren in ihrer letzten Einstellung stehen. Soll die Raumzeigermodulation gestoppt werden, so muss zuerst die Freigabe unterbrochen oder der Leistungsteil vom Netz abgetrennt werden. Derzeit ist dazu ein von Hand zu betätigender Schalter installiert. Beim Programmstart werden zuerst die Schütze für die Widerstände zugeschaltet. Danach wird die Raumzeigermodulation (RZM) gestartet. Die Eingangswerte dafür werden aus der Parkrücktransformierten von $1/\sqrt{3}$ mit dem Winkel der Netzspannung errechnet. Es entsteht nun ein Potentialgefälle und wie in Kapitel 1.4.2.1 bereits erläutert ein Stromfluss. Bei der Ermittlung der Effektivwerte wird davon ausgegangen, dass sich der Wechselrichter im idealen europäischen Verbundnetz³⁴ befindet. Alle Strommesswerte werden nach dem Prinzip aus Kapitel 1.4.1.2 erfasst. Bei einer Abtastfrequenz von 10 kHz ergeben sich genau 200 Messwerte pro Periode, aus denen der Effektivwert gebildet wird und in die Struktur unter 6, 7 und 8 abgespeichert wird. Ob ein Fehler vorliegt, wird über die Auswertung der Effektivwerte mit den im Vorfeld berechneten Werten für einen Phasenfehler verglichen. Liegen keine Fehler vor, so überprüft der DSP als nächstes die Drehwinkel von Strom und Spannung.

Dazu benutzt die Funktion zwei Arrays, welche fortlaufend gefüllt werden. In jedem Array ist Platz für 21 Werte. Sobald der Drehwinkel der Spannung wieder identisch 0 wird, werden noch die nachfolgenden 10 Werte in das Array fortlaufend eingetragen. Nachdem der Drehwinkel der Spannung identisch 0 war, wird darauf gewartet bis der Drehwinkel des Stromes identisch 0 wird und die nachfolgenden 10 Werte werden auch noch fortlaufend eingetragen. So entstehen zwei Arrays mit 10 Werten vor der 0 und 10 Werten danach. Außerdem wird beim Wechsel des Stromwinkels von 2π auf 0 der aktuelle Spannungswinkel in einer Variable gespeichert. Bei beiden kann einfach nachgeprüft werden ob vor der 0 und nach der 0 ein stetiger Anstieg verzeichnet werden kann. Um noch den Phasenversatz herauszufinden nutzt man die Variante, welche bereits im Kapitel 3.4.2.5 vorgestellt wurde. Als Bedingung für das Erkennen des Korrekten Anschlusses werden $\pm 60^\circ$ als untere- und obere Grenze angesetzt.

Damit ist die Selbstdiagnose abgeschlossen und es wird begonnen den Strom über den Widerstand auf 0 auszuregeln.

4.3.5 Funktionsbaustein normierung.c

Dieser Funktionsbaustein enthält zwei Funktionen: zum Umrechnen der vom A/D-Wandler

³⁴ Frequenz von 50Hz, Spannungseffektivwert von 230V (keine Abweichung von den Werten)

gelieferten Ergebnisse in ihre jeweiligen Zahlenformate für Strom und Spannung und zum Bilden der Gleichanteile von den einzelnen Leiterströmen. Die Gleichanteilbildende Funktion ermittelt aus mehreren Messwerten den Gleichanteil der Ströme und subtrahiert das Ergebnis von den gewandelten Stromwerten. Zur Zeit wird aus 200 dieser Messwerte, also über 20 ms aus den Strömen, der Gleichanteil bestimmt. Danach hat man nur noch den Wechselanteil der Ströme. Somit ist gewährleistet, dass die Park-Transformierte der Ströme keine Störungen durch Gleichanteile aufweist. Anschließend findet eine Anpassung der A/D-gewandelten Zahlen mit den zugehörigen Werten aus Tabelle 3 statt sowie das Abspeichern der Messwerte in die angelegten Strukturen für Ströme, Spannungen und Systemparameter. Mit diesen so aufbereiteten Daten sind nun alle weiteren Berechnungen durchzuführen. Danach wird die Funktion Normierung aufgerufen und die berechneten Daten für die Eingangsfunktion der Raumzeigermodulation angepasst.

Die Funktion „normierung(_stDatenInFesteAchsen *, _stSystemParameter *)“ benötigt aus der ersten Struktur die Werte „alpha“ und „beta“. Für eine Netzsynchrone Erzeugung der Ausgangsspannung muss diese direkt von den Spannungswandlern der Netzphasen U, V und W berechnet sein. Dieser Anteil ist der statische und bildet mit seinen Alpha- und Beta-Werten eine exakte Netzkopie mit ihren Oberwellenanteilen nach, da sie direkt aus den Spannungswandlern gebildet wird. Die anderen benötigten Werte werden aus der Systemparameterstruktur entnommen. Es wird nun folgendes, jeweils für den Alpha- und Beta-Anteil berechnet und in der Systemparameterstruktur abgespeichert:

$$RZM_{\text{Eingangswert}} = \text{Anteil}_{\text{statisch}} + \text{Anteil}_{\text{dynamisch}} \quad \text{F(4.51)}$$

Der statische Anteil errechnet sich wie folgt, gezeigt an den werten für Alpha:³⁵

$$\text{Anteil}_{\text{statisch}} = \frac{\alpha_U \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ddot{u}}{\frac{U_{ZK}}{\sqrt{3}}} \quad \text{F(4.52)}$$

Der dynamische Anteil, kommend von der Stromregelung ergibt sich wie folgt:

$$\text{Anteil}_{\text{dynamisch}} = \frac{\alpha_I}{\frac{U_{ZK}}{\sqrt{3}}} \quad \text{F(4.53)}$$

Die errechneten Werte werden in der Systemparameterstruktur im Zahlenformat Q1.15 abgespeichert und sind für die Funktion „RZM()“ vorgesehen.

4.3.6 Sonstige Funktionen

Am Beispiel der Funktionsbibliothek „arithmetik.c“, wurde bereits deutlich aufgezeigt, dass für bestimmte Rechenoperationen Funktionen angelegt werden müssen. Damit werden

³⁵ Für Parameterbezeichnungen vgl. Abbildung 4-45

unter anderem Zahlenformate angepasst oder Daten zur weiteren Berechnung aufgearbeitet. Als weitere Bibliotheken für solche kleine Aufgaben wurde die „trigo.c“ programmiert.

4.3.6.1 Bibliothek „trigo.c“

Sie enthält drei trigonometrische Funktionen, angepasst auf die verwendeten Integer-Variablen im Qn.m-Format und an möglichen Stellen auf Berechnungsgeschwindigkeit optimiert. Die berechneten Winkel liegen dem DSP als Integer von 0 bis 4096 vor und entsprechen hierbei immer einem Vielfachen von $0,0879^\circ$ beziehungsweise $0,00153 \text{ rad}$, also mit einer Auflösung von $360^\circ / 4096$. Die Bogenmaße sind für einen Genauigkeitsgewinn nicht um 14 Bit sondern um 15 Bit verschoben, liegen also im Q1.15 vor.

Eine der Funktionen berechnet den Sinus eines Winkels oder exakt ausgedrückt, entnimmt aus einer vordefinierten Liste das dazugehörige Bogenmaß. Um Programmspeicherplatz einzusparen wurde die Liste auf 90° reduziert, einem Eingabewert von 1024. Wird der Funktion eine Zahl übergeben, welche größer als 1024 und kleiner als 2049 ist, so nutzt das Programm dieselbe angelegte Liste, durchläuft sie aber von hinten nach vorne und wird den dritten und vierten Quadranten in der Weise fortgeführt, das erhaltene Ergebnis aber noch negiert. Durch das Herausnehmen des Ergebnisses aus einer Liste wird Rechenzeit eingespart und der Programmablauf benötigt immer dieselbe Anzahl an Tackten in einem Quadranten.

Für die Cosinusberechnung wird die zuvor beschriebene Sinusberechnung herangezogen. Der übergebene Winkel bekommt durch Addition mit 1024 einen höheren Wert und wird an die Sinusberechnung übergeben. Durch die Addition ist der Winkel um 90° und somit auch das Rechenergebnis um 90° verschoben und entspräche damit dem Cosinus eines Winkels.

Der Arkustangens ließ sich nicht so einfach durch Heraussuchen aus einem Array bestimmen. Bei Interesse kann im Anhang eine funktionsfähige Lösung mittels Array nachgeschlagen werden. Probleme sind allerdings bei den Rechenzeiten entstanden. Zum einen waren Sie variabel und zum anderen teilweise zu lang ($>50 \text{ us}$). Es hat sich hier herausgestellt, dass die Standardfunktion aus der „math.h“ mit float-Variablen ein schnelleres und genaueres Ergebnis liefert. Der Verlauf des Arcustangens liegt im Wertebereich von $-\infty$ bis ∞ und erreicht dabei Werte von $-\pi/2$ bis $\pi/2$. Für die richtige Lagebestimmung des Drehwinkels Theta für Ströme und Spannungen muss demzufolge eine Korrektur der Quadranten durchgeführt werden. Die Korrektur unterliegt den Bestimmungen der komplexen Rechenregeln nach Formel F(1.6). Nachfolgend der Quelltext.

```
1. float i = atan(((float)dividend)/((float)divisor));
2.         if( (dividend>=0 && divisor<0) ||
3.             (dividend<0 && divisor<=0))
4.             i += 3.141592653589793238462643383279;
5.         if( dividend<0 && divisor>0)
6.             i += 2*3.141592653589793238462643383279;
```

```
7.         return (int)(i/0.00153398978789);
```

Zurückgegeben wird von der Funktion eine Integer-Variable von 0 bis 4096, die immer abgerundet wird.

4.4 Zusammenfassung

Die in Simulation erarbeitete, gleichzeitig ablaufende Programmierung wurde sinnvoll in einzelne Module gegliedert. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf eine vielseitige Nutzung der Module, sodass sie in eine Ablaufreihenfolge gebracht werden können. Anschließend mussten für die zu messenden Werte Umrechnungsfaktoren entstehen. Die gemessenen Eingangswerte von Strom und Spannung sind im DSP nur als Integer-Zahlen von 0 bis 65536 verfügbar. Eine Vereinheitlichung ist mit diesen Umrechnungsfaktoren auf ein Festkommazahlenformat gegeben und ein Modul für dessen Umsetzung wurde programmiert. Beim Verwenden von Festkommazahlen ist es unabdingbar eine Festkommaarithmetik zu implementieren. Denn zwei Zahlen mit verschiedener Kommaposition kann man nicht einfach verrechnen. Die dafür benötigte Arithmetik wurde entwickelt und implementiert. Sie bildet die Grundlage für weitere Berechnungen. Es wurden Module für die Clark- und Park-Transformation im Hinblick auf eine vielfältige Nutzung für Grund- und Oberwellen entwickelt. Zur Umsetzung der Transformationen sind Winkelfunktionen wie Sinus, Cosinus und Arkustangens nötig. Die C-Standardbibliothek „math.h“ liefert diese mit, doch für einen schnelleren Programmablauf wurde eine eigene Lösung erarbeitet. Der programmierte PI-Regler kann sowohl für die Grundschiwingung als auch für die Oberwellenkomensation verwendet werden. Eine Nutzung dieses Moduls für Asynchronmaschinen ist ohne Probleme möglich. Außerdem kann der Anwender entscheiden ob er einen P-, einen PI- oder einen PID-Regler verwenden möchte. Für die Besonderheit der Netzeinspeisung ist das Modul „normierung.c“ entstanden. Hier werden alle Parameter zusammengeführt und die Eingangsgröße für die Raumzeigermodulation im Netzbetrieb berechnet. Beim Netzbetrieb kann der Wechselrichter nicht so betrieben werden, wie für den Betrieb von elektrischen Maschinen. Mit der „inbetriebsname.c“ wird ein gefahrloses Einschalten sichergestellt.

5 Versuchsaufbau und Messergebnisse

Nach den Simulationen soll nun praktisch überprüft werden, ob der Wechselrichter mit den zuvor erarbeiteten Lösungsvorschlägen an das Netz angeschlossen werden kann. Dafür werden zwei Testaufbauten realisiert. Der erste Testaufbau besteht aus einem Asynchronmotor. Hier soll einerseits der Nachweis erbracht werden, dass die Raumzeitmodulation mit den Eingangswerten die gewünschten Ausgangswerte liefert und zum anderen, dass der Wechselrichter eine netzsynchrone Spannung mit minimalen Abweichungen erzeugt. Der zweite Testaufbau wird genutzt um die Inbetriebnahme und den Regler zu verifizieren.

5.1 Aufbau ohne Netzankopplung

An den Wechselrichter wird direkt ein Asynchronmotor im Sternbetrieb angeschlossen. Somit erhält man einen ohm'schen und einen induktiven Anteil. Über alle 3 Phasen kann nun zum Sternpunkt die Spannung gemessen werden. Der Wechselrichter wird hier mit einem in der Spannungslänge konstantem Drehzeiger moduliert. Der erzeugte Drehzeiger wird direkt aus den erfassten Messwerten des Netzes generiert und am Wechselrichter ausgegeben. Ziel dieses Versuchs ist es, nachzuweisen, dass die Istwerterfassung und Verarbeitung dieser bis zur Ausgabe fehlerfrei arbeitet. Zur Veranschaulichung zeigt nachfolgende Abbildung die drei Strangströme der eingespeisten Spannungen.

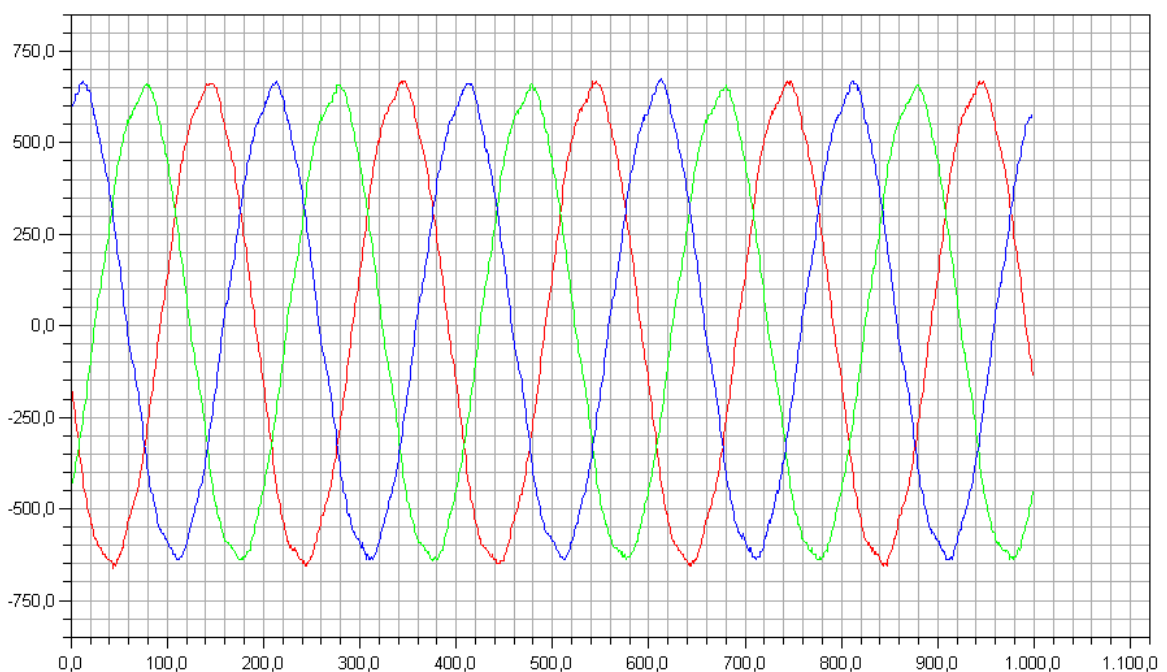


Abbildung 5-46 Ströme der Asynchronmaschine am Wechselrichter

Zur Erklärung für die schlechte Wiedergabe einer Sinuswelle, gerade im oberen und unteren Bereich der Wendepunkte schaue man sich dazu die Eingangswerte von Alpha und

Beta in diesem Bereich an. Je schlechter die Eingangswerte der Netzspannung, umso schlechter auch die Ausgabewerte des Wechselrichters.

Als nächstes wird der Zeitversatz zwischen den Eingabe- und Ausgabewerten näher betrachtet. Weil die Verarbeitung der Daten Zeit erfordert, soll auch dieser Zeitverzug überprüft werden, also welche Zeit der Wechselrichter bei der Ausgabe der vorgegeben Sollwerte vorweist, sowie ob die vorausberechnete Spannungshöhe erreicht wird. Der Regler ist jetzt noch nicht aktiv. Die Phasenlage wird mittels der Clarke-Transformation ermittelt. Nachfolgendes Bild zeigt die Alpha- und Beta-Spannungen sowie den Drehwinkel Theta der Eingabewerte.

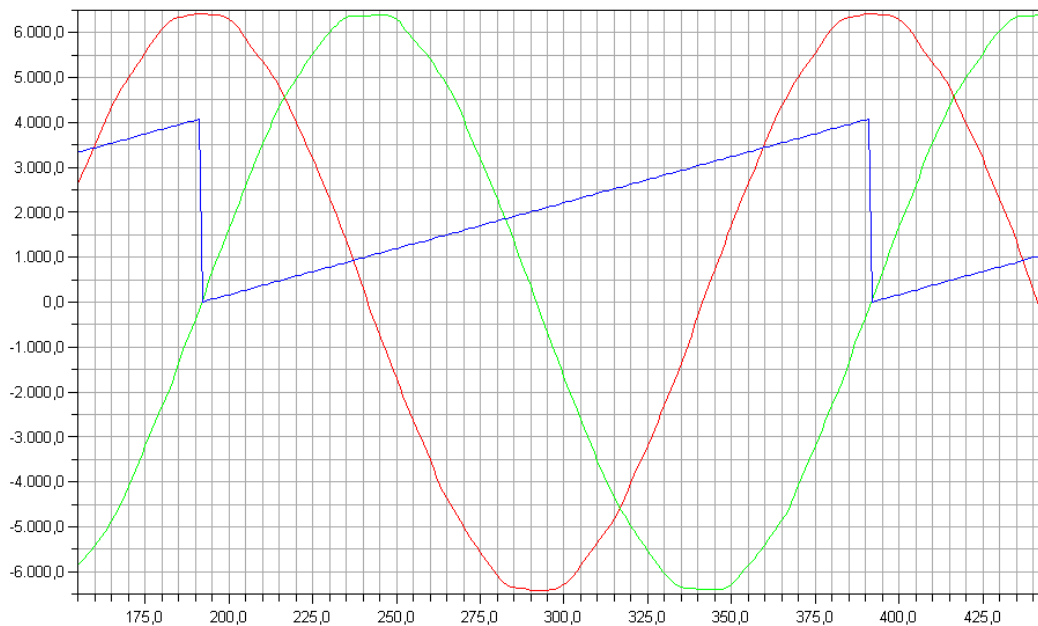


Abbildung 5-47 Alpha, Beta und Theta der Netzspannung berechnet vom DSP

Die Werte wurden direkt mit dem DSP durch Messungen und Berechnungen mit dem C-Programm `clarktransformation.c` aus Kapitel 4.3.1 für unsymmetrischen Betrieb ermittelt. Weitere Bilder sind im Anhang [A11] und [A12] nachzuschlagen.

Im Anhang [A14], [A15] und [A16] sind auch die Oszillogramme der Spannungsmessungen zu finden. Als erstes sieht man eine vollständige Periode mit Netzfrequenz. Dort ist zu erkennen, dass es einen Zeitversatz zwischen der Netzspannung und der Ausgangsspannung des Wechselrichters gibt. Die Ausgangsspannung des Wechselrichters ist trotz des Phasenversatzes mit der Netzspannung frequenzgleich. Im nächsten Anhang wurde mit einem Oszilloskop ein Phasenversatz von ca. 133 μ s ermittelt und kann für den Regler als allgemeine Verzögerungszeit des Wechselrichters angenommen werden. Das letzte der drei Bilder zeigt die Ausgangsspannung im vollen Frequenzbereich und ergibt am Multimeter sowie am Oszilloskop einen Effektivwert von rund 200 V und entspricht dem eingestellten Drehzeiger, welcher auch der maximal möglichen Länge einer Wechselrichterzwischenkreisspannung von 563 V entspricht.

Mit diesem Test konnte nachgewiesen werden, dass die ermittelten Messwerte eine Raumzeigermodulation ermöglichen und die Module clarktransformation.c, arithmetik.c und RZM.c funktionieren.

5.2 Aufbau mit Netzankopplung

In diesem Abschnitt wird zum einen auf die Annahmen aus Kapitel 3.4.2. Bezug genommen. Dabei wird der Anschluss des Wechselrichters mit dem Netz überprüft und festgehalten, wie sich dies unter realistischen Voraussetzungen verhält. Weiterhin soll der Regler über die Widerstände in Betrieb genommen und auf 0 A ausgeregelt werden, so dass der Wechselrichter in den Netzbetrieb überführt werden kann und dabei kein unzulässig hoher Strom fließt. Ist der Wechselrichter in den Netzbetrieb überführt, dann wird eine Sprungantwort vom Regler abverlangt und somit überprüft, ob die Simulation mit der Realität übereinstimmt. Problematisch bei der Inbetriebnahme am Netz war dabei der FI-Schutzschalter des Laboranschlussplatzes. Es musste zwischen Stelltransformator und dem Wechselrichter ein zusätzlicher Trenntransformator installiert werden. Die Regelparameter sind demnach neu berechnet.

5.2.1 Ohne Regelung über die Widerstände

Über die Widerstände fließt zunächst kein Strom. Sie sind zwischen Wechselrichter und Transformator geschaltet. Die aufgezeichneten Ströme sind die Eisenverluste der Hysteresse des Transformatorblechs. Die abzulesenden Spitzenwerte in Abbildung 5-48 von 200, 280 und 340 entsprechen in etwa 100 mA, 136 mA und 166 mA.

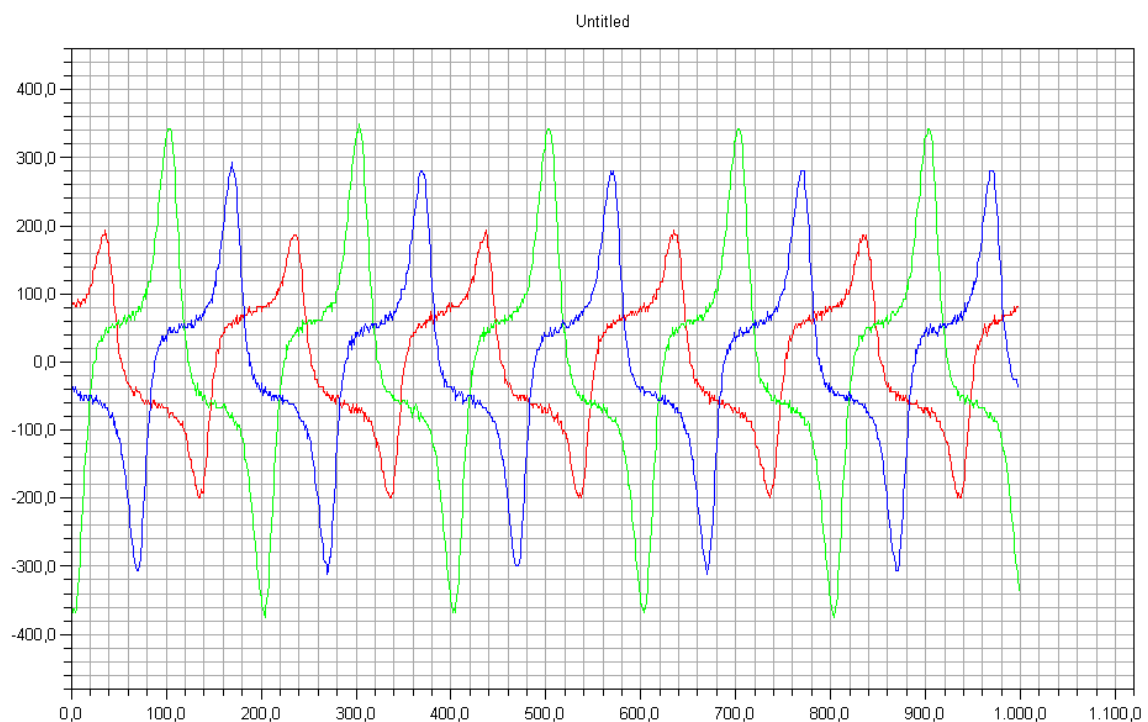


Abbildung 5-48 Leerlaufströme U, V und W des Transformators

Selbst aus nichtsinusförmigen Größen kann die vollständige Clarke-Transformation noch auswertbare Ergebnisse liefern. Die drei Phasenströme sind einerseits von ihrer Form nicht mehr sinusförmig und andererseits ist auch eine starke Unsymmetrie vorhanden. Schwierigkeiten bereitet der Gleichanteil in den Strommesswerten, den es herauszufiltern gilt. Daraus resultieren unter anderem die „welligen“ Alpha- und Beta-Werte und daraus ein „welliger“ Drehwinkel des Stromzeigers. Es ist dennoch möglich den Strom- und den Spannungszeiger auszuwerten und die Drehrichtung sowie den Phasenversatz festzustellen. Bei zunehmenden Stromfluss werden die Störungen kleiner.

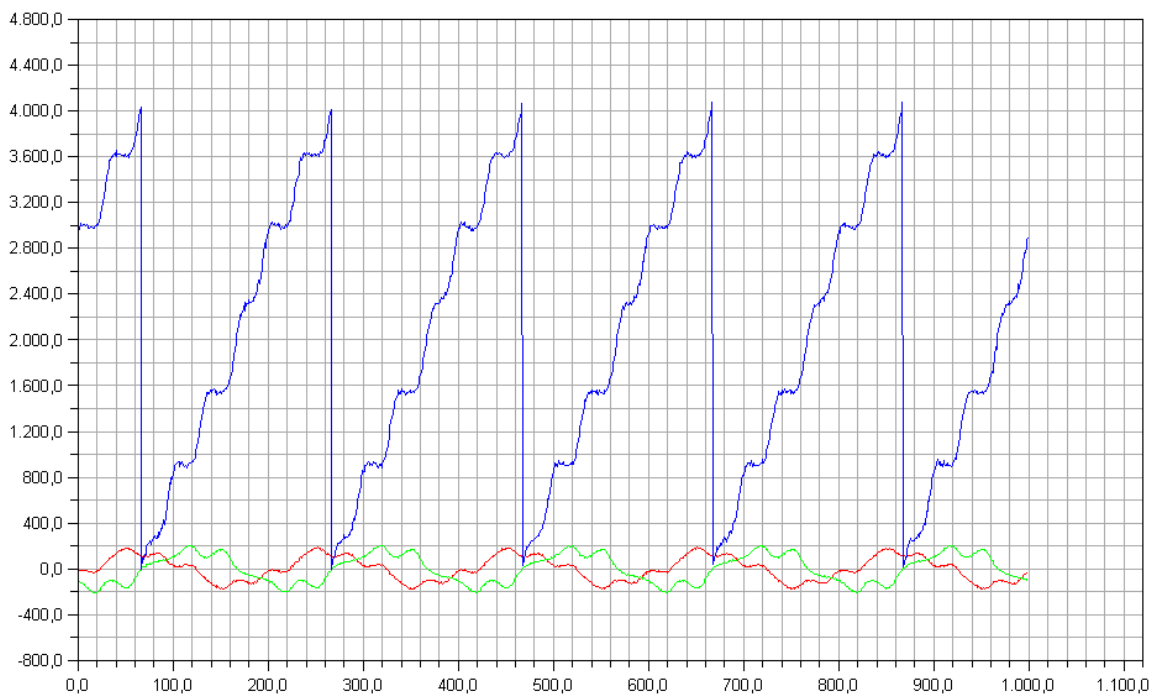


Abbildung 5-49 Alpha, Beta und Theta der Leerlaufströme des Transformators

5.2.1.1 Keine Phasenverpolung

Als nächstes überprüft der Wechselrichter die Stromstärke, um den korrekten Anschluss der Leitungen zwischen Wechselrichter und Transformator sicherzustellen. In diesem Versuch wurde die Raumzeigermodulation mit denselben Parametern aus dem ersten Testaufbau gestartet, also einem Spannungszeiger von 282,84 V. Die Anschlussbelegung vom Wechselrichter zum Transformator ist phasengleich nach Abbildung 3-30 vorgenommen. Es sind noch deutlich die Spannungsspitzen vom Leerlaufstrom des Transformators aus 5.2.1 zu erkennen. Überlagert wird jetzt noch der Strom durch die Widerstände. Aus Abbildung 5-46 ist ersichtlich, dass der Wechselrichter sinusförmige Ströme generiert. Also muss dieser in Abbildung 5-50 gemessene Strom vom Netzverlauf vorgegeben sein. Der Wechselrichter generiert eine Kopie der Netzspannung, das heißt im Spannungsverlauf des Wechselrichters sind die Oberwellen des Netzes mit aufmoduliert. Zusätzlich kommt noch die Verzögerungszeit des Wechselrichters zum Generieren der Ausgangsspannung von 133 μ s, was 2,394° entspricht. Ein weiteres Bild dieses Stromes ist im Anhang [A13] zu finden. Die gemessenen Ströme mit einem Effektivwert von ca. 400 mA sind noch zu gering, um eindeutig als Fehler erkannt zu werden. Für den vorausberechnete

te Fehlerstrom liegt der Effektivwert bei 1 A. In Anbetracht der abgebildeten Ströme lässt sich erwartungsgemäß feststellen, dass auch die Alpha-, Beta- und Theta-Werte sehr unruhig verlaufen.

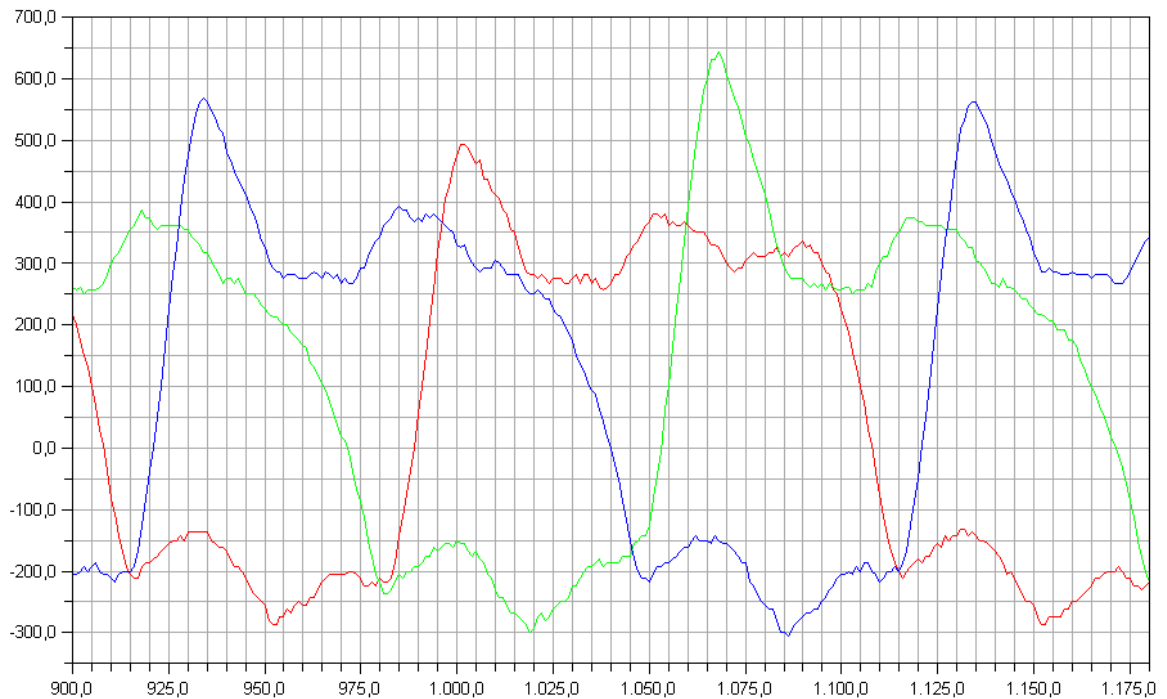


Abbildung 5-50 Ströme der drei Phasen bei Einspeisung über Widerstände nach 3.4.2.1

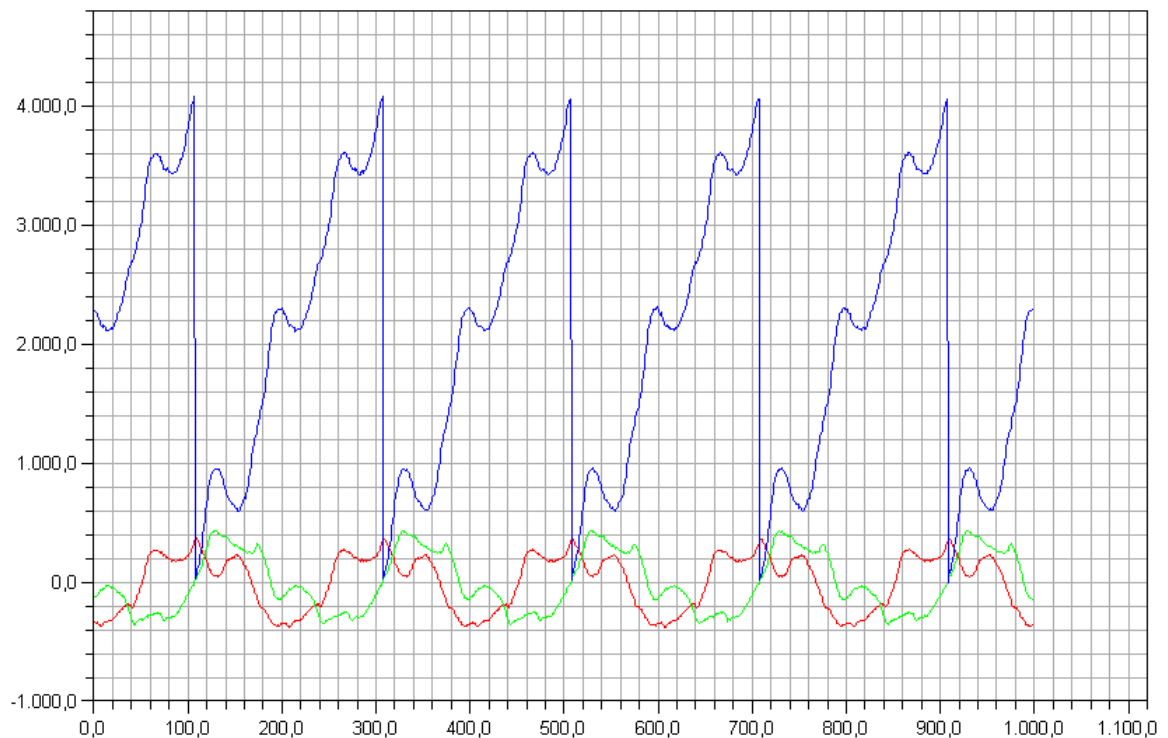


Abbildung 5-51 Alpha, Beta und Theta des Stromes bei phasenrichtiger Einspeisung

Es dürfte auch hier wieder eine Ermittlung des korrekten Anschlusses der Messgeräte am A/D-Wandler erschwert werden. In diesem Programmabschnitt wurde festgestellt, dass

der Wechselrichter phasengleich am Netz angeschlossen wurde und deshalb findet hier auch eine Auswertung des Stromdrehwinkels statt. Allerdings muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass eine Validierung des Verfahrens nicht vorgenommen werden konnte. Die sich einstellenden Ströme mit ihren sägezahnförmigen Verläufen in einem 100 μ s Taktzyklus sind oftmals nicht mehr auswertbar. Im Laufe der Hardwareerweiterung des Prototypen wurden Änderungen an der Stromistwerterfassung vorgenommen, so dass sich die Qualität der Strommesswerte stark verschlechtert hat. Der Stromwinkel weißt nun eine höhere Welligkeit bis hin zu mehreren Nulldurchgängen im Bereich so kleiner Ströme auf. Somit kann keine sichere Auswertung mehr erfolgen. Sollen keine weiteren Änderungen an der Stromistwerterfassungen vorgenommen werden, so kann es sinnvoll sein die Ströme durch das zusätzliche Einbringen von Drosseln in den Strompfad zwischen Wechselrichter und Messwandler. Dadurch wird eine Glättung des Stromes erreicht und der sägezahnförmige Verlauf wird gedämpft. Negativ kann sich das auf die Dynamik der Regelung auswirken.

5.2.1.2 Zwei verpolte Phasen

Als nächstes wurden zwei Phasen, so wie in Kapitel 3.4.2.2, vertauscht. Jetzt ist schon deutlicher der sinusförmige Verlauf der Ströme erkennbar. Die Sinuswelle ist an ihren Maxima und Minima wieder abgeflacht.

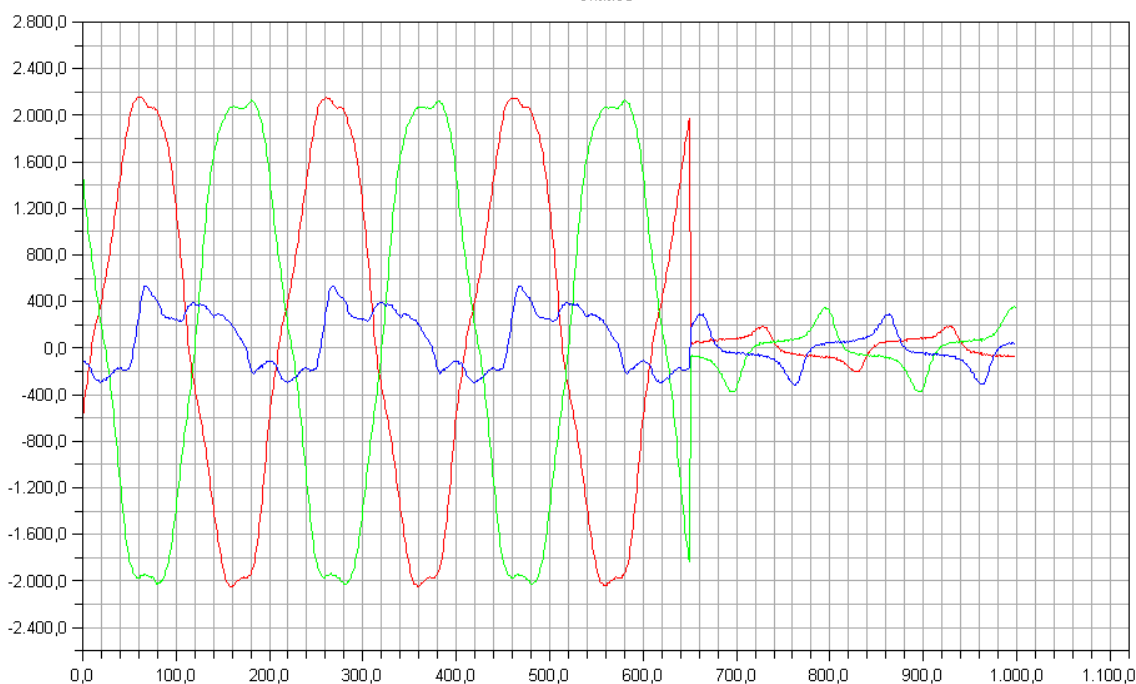


Abbildung 5-52 Ströme der drei Phasen bei zwei vertauschten Phasen

Dies kann wieder auf die Form der Netzspannung zurückgeführt werden. Die Alpha- und Beta-Werte der Netzspannung weisen genau diese Abflachungen auf.

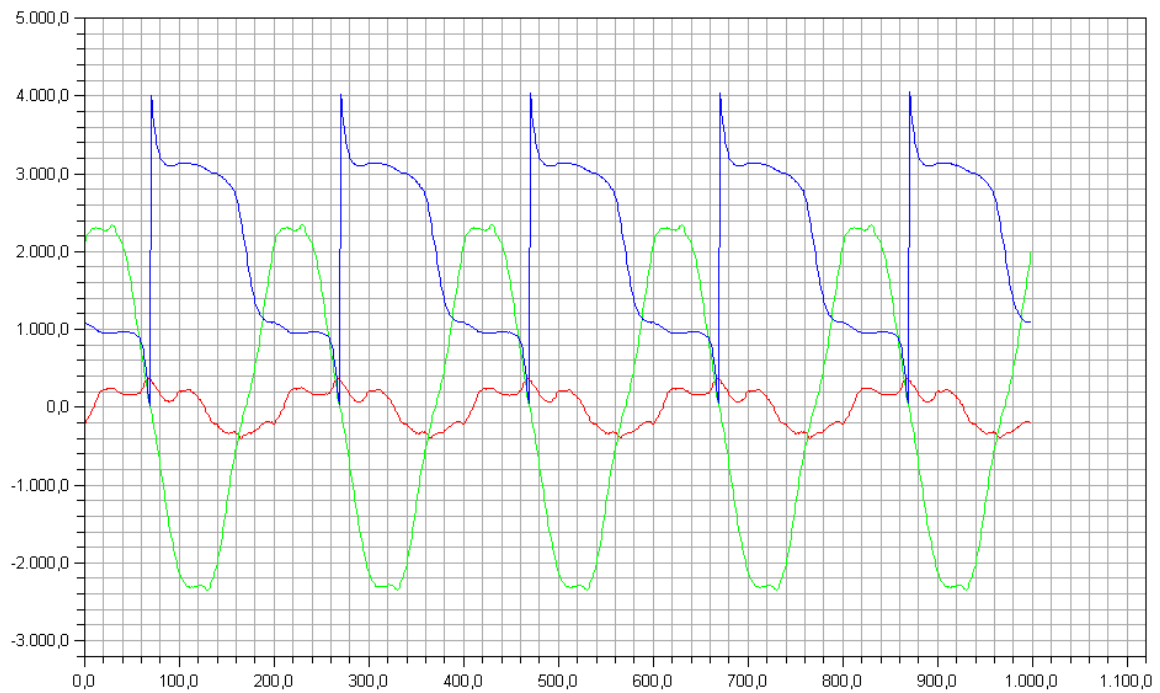


Abbildung 5-53 Alpha, Beta und Theta des Stromes bei zwei Phasen vertauscht

Mit einem Stromfluss in den zwei vertauschten Phasen bei einem Effektivwert von 1 A ist der Fehler eindeutig detektierbar. Die Auswertung des Drehwinkels muss hier nicht erfolgen, da bereits ein Fehler vorliegt, der behoben werden muss. Der sich ergebende Drehwinkel stimmt jedoch mit dem der Simulation gut überein.

5.2.1.3 Drei verpolte Phasen

Werden alle Phasen vertauscht, so ist erwartungsgemäß auch in allen Phasen ein erhöhter Strom vorzufinden. Simulationsergebnisse und Messergebnisse decken sich hier. Schön zu erkennen ist auch der Versatz des Phasenwinkels. In Abbildung 5-55 ist neben dem Alpha- und Beta-Wert des Stromes auch sein Drehwinkel zu sehen. Der auftretende Sprung bei 200 wurde durch das Abschalten der RZM hervorgerufen.

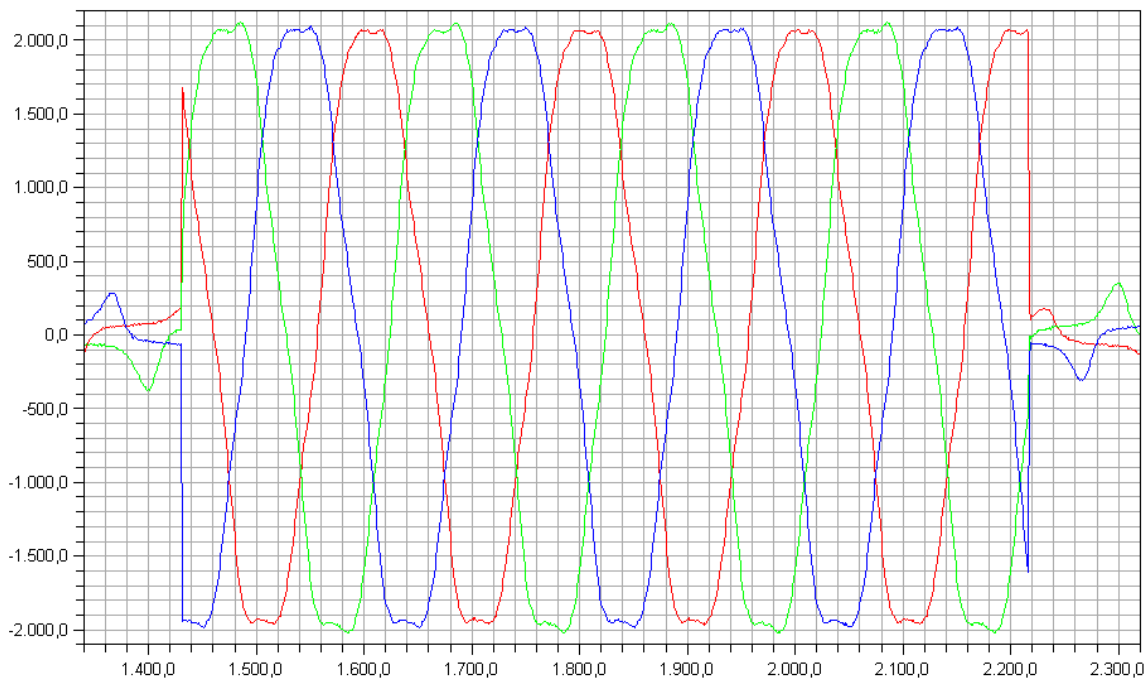


Abbildung 5-54 Ströme der drei Phasen bei drei vertauschten Phasen

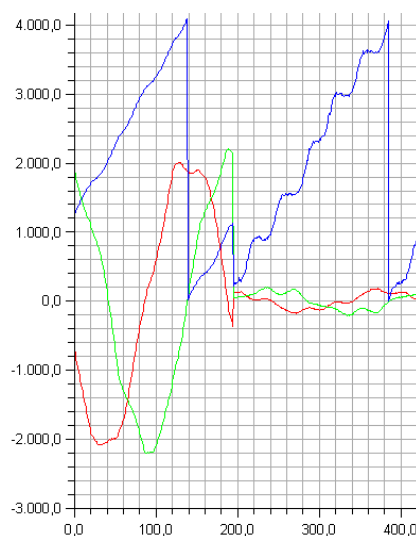


Abbildung 5-55 Alpha, Beta und Theta des Stromes bei drei Phasen vertauscht

5.2.2 Mit Regelung

Der programmierte Regler soll anhand des Testaufbaus über eine Sprungantwort verifiziert werden. Nach der Inbetriebnahme bzw. dem Selbsttest soll die Raumzeigermodulation einen Spannungszeiger einstellen, der dem des Stelltransformators entspricht. Demzufolge würde unter idealen Bedingungen kein Stromfluss zustande kommen, da auf beiden Seiten das gleiche Potential anliegt. Unter praktischen Bedingungen ist nicht davon auszugehen, dass einerseits der Wechselrichter exakt phasengleich einspeist, noch dass der Transformator keinen Leerlaufstrom hat, wie es im vorherigen Kapitel deutlich erkennbar war. Auch sind die Ströme aufgrund der nicht linearen Magnetkennlinien im Sättigungsbe-
reich nicht zwingend sinusförmig. Weiterhin kann postuliert werden, dass die Spitzenwerte der Netzspannung in allen drei Phasen unterschiedliche Höhen aufweisen.

5.2.2.1 Ermittlung der Regelstrecke

Die im Kapitel 2 ermittelten und im Kapitel 3 simulierten Transformatorparameter haben in den anfänglichen Tests ohne Reglerbetrieb durch die stark sägezahnförmigen Ströme Grund zu der Annahme gegeben, dass die ermittelten Werte falsch sein könnten. Daraufhin wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt. Dabei konnten gleich die Parameter des Trenntransformators mitbestimmt werden. Die mit den neuen Werten simulierten Ergebnisse lassen die Aussage zu, dass mit den wiederholten Messungen Werte gefunden wurden, die denen der Realität eher entsprechen könnten als die zuvor.

Für beide Transformatoren wurde ein einfacheres Messverfahren angewandt als die vorherige Messung des Stelltransformators. Jeder Transformator wurde für sich auf einer Seite kurzgeschlossen und mit einem Gleichspannungssprung belegt. Mit einem Oszilloskop wurden der Strom und die Spannung gemessen. Dabei entsteht ein exponentiell ansteigender Strom. Auf der Stromkurve kann man bei 63,2 % vom Maximum die Zeitkonstante mit dem Oszilloskop ermitteln. Der Wicklungswiderstand wird durch eine angelegte Gleichspannung aus Strom und Spannung berechnet. Für den Stelltransformator hat sich ein Widerstand von 1,809 Ohm und eine Induktivität von 0,004342 H ergeben. Das Messprotokoll ist im Anhang [A3] beigefügt.

Daraus ergibt sich eine neue Übertragungsfunktion des Transformators.

$$G_{\text{Trafo}}(s) = \frac{1/R_{\text{Trafo}}}{L_{\text{Trafo}}/R_{\text{Trafo}} \cdot s + 1} = \frac{0,55279}{0,0024 \cdot s + 1}$$

Für den zusätzlich in Reihe geschalteten Trenntransformator wurden die Werte äquivalent zum Stelltransformator ermittelt. Der Widerstand wird mit 0,0818 Ohm beziffert und die Induktivität mit 0.579 mH. Für beide Transformatoren resultiert nun folgende Übertragungsfunktion.

$$G_{\text{Trafo}}(s) = \frac{1/(R_{\text{Trafo}} + R_{\text{Trenntrafo}})}{(L_{\text{Trafo}} + L_{\text{Trenntrafo}})/(R_{\text{Trafo}} + R_{\text{Trenntrafo}}) \cdot s + 1} = \frac{0,5289}{0,0025759 \cdot s + 1}$$

Das Bodediagramm für die Gesamtstrecke aus Stelltransformator, Trenntransformator und Wechselrichter ist im Anhang [A9] zu finden

Nach dem Betragsoptimum aus den Kapiteln 1.5.1 und 2.4.2 ergeben sich folgende Reglereinstellungen: Eine Proportionalverstärkung K_p von 16,23 und eine Integralverstärkung K_i von 6302,667. Das Bode-Diagramm für die gesamte Strecke nach dem Betragsoptimum ist im Anhang unter [A10] zu finden.

Die Durchtrittsfrequenz liegt bei 480 Hz. Der Regler hat danach noch eine Phasenreserve von 65°.

5.2.2.2 Simulation mit neuen Reglereinstellungen

Im Simulationsprogramm wurde der Transformator so umgearbeitet, dass er als idealer Transformator fungiert. Dazu wurden in den Feldern für die Längselemente Werte im Nano- und in den Querelementen im Mega-Bereich eingegeben. Vor den Transformator wurden die Ersatzelemente aus Widerstand und Spule nach Abbildung 1-9 modelliert und die neu berechneten Reglerverstärkungen eingegeben.

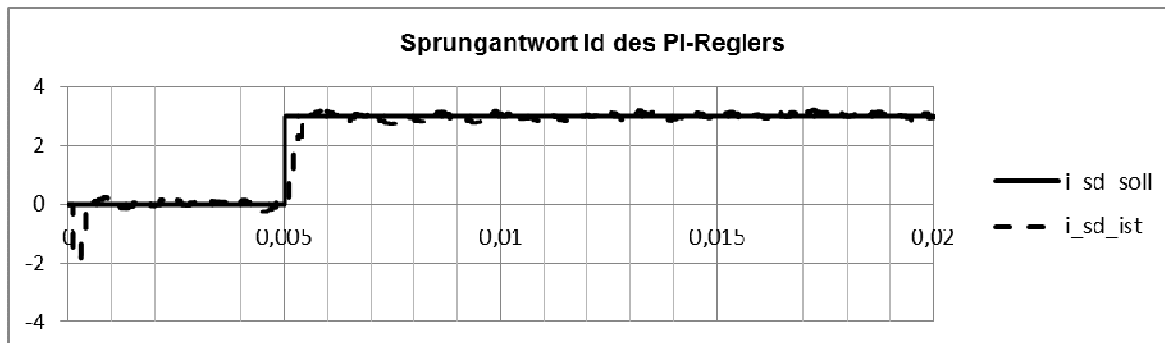


Abbildung 5-56 Reglersprungantwort mit neuen Systemparametern auf 3 A

Die eingespeißten Ströme haben durch die zu geringe Glättung einen deutlich sichtbaren sägezahnförmigen Verlauf.

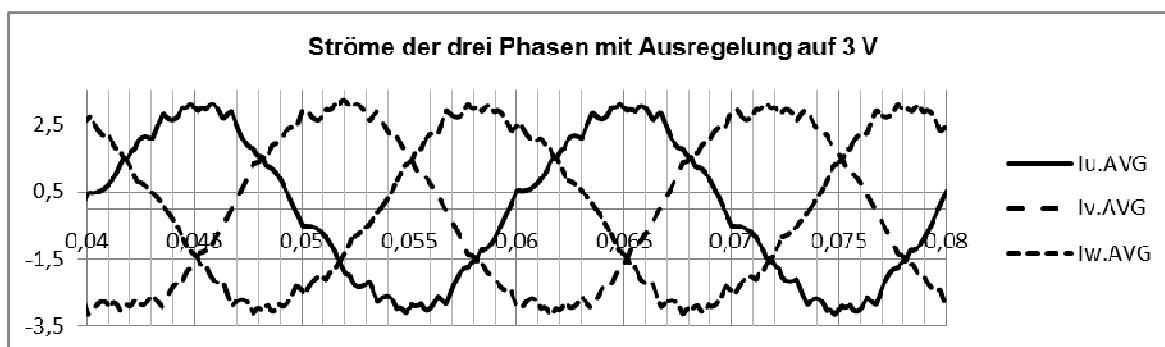


Abbildung 5-57 Simulierte Ströme der drei Phasen mit neuen Streckenwerten

Problematisch beim Einspeisen von kleinen Strömen ist, dass die Streuinduktivitäten des Transformators zu klein sind und somit die Gradienten der Ströme über den Induktivitäten zu groß sind. Messwerte können nicht mehr ausreichend genau, mittels einmaligem Messen, erfasst werden. Wenn die Eingangswerte so stark schwanken ist es wahrscheinlich, dass die Regelung zum Schwingen neigen wird. Es ist empfehlenswert, zwischen den Wechselrichter und dem Transformator zusätzliche Drosseln zu verbauen. Da diese für den Versuchsaufbau aber nicht vorgesehen und nicht vorhanden sind, wurde dies softwaretechnisch für den Versuchsaufbau gelöst, wie bereits im vorhergehenden Kapitel erläutert. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass dieser Zustand in weiterführenden Arbeiten unbedingt verbessert werden sollte. Im Rahmen dieser Arbeit sind die Ressourcen dafür nicht vorhanden.

Im folgenden Bild ist die Stromhalbwellen einer Phase zu sehen. Deutlich zu erkennen sind die Sägezähne auf der Grundwelle. Mit diesen erfassten Werten kann es unter

ungünstigen Bedingungen zu falschen Eingabewerten im DSP kommen und somit zu einer unkorrekten Arbeitsweise der Regelung.

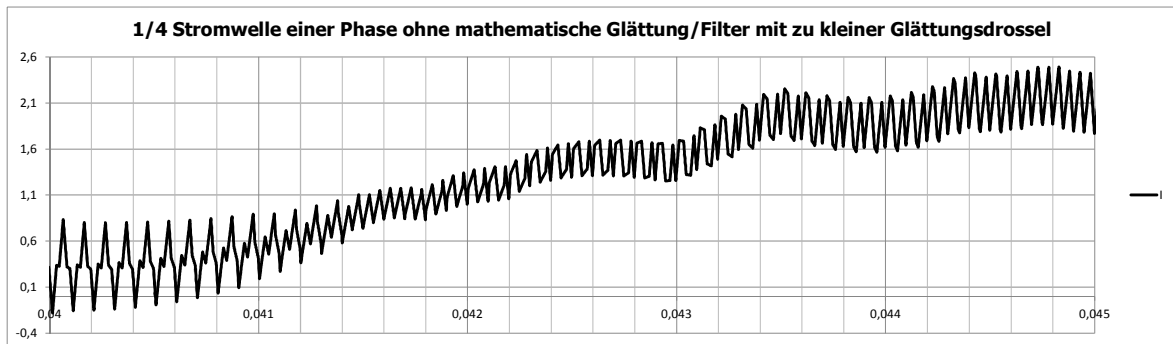


Abbildung 5-58 Zoom in den ersten Quadranten eines Leiterstromes

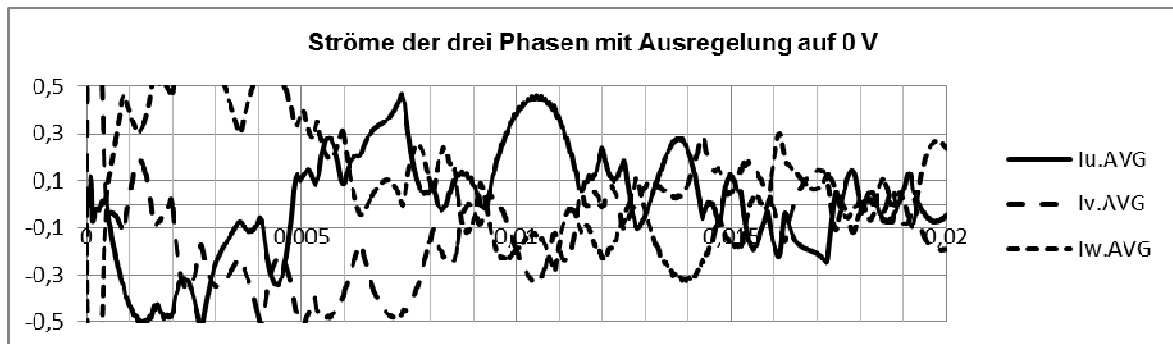


Abbildung 5-59 Ausregelung Wechselrichter – Netz auf 0 A

Abbildung 5-59 zeigt die Stromverläufe der drei Phasen zwischen Wechselrichter und Netz bei einer Ausregelung von 0 A.

5.2.2.3 Ausregelung über Widerstände auf 0A

Mit den gefundenen Regelverstärkungen ist im Programm eine Sollwertvorgabe für den d- und den q-Anteil von 0 A eingestellt. Die resultierenden Strangströme ergeben ein ähnliches Rauschen wie die simulierten Ströme. Die abgebildeten Ströme haben einen Effektivwert von näherungsweise 100 mA.

An Strömen mit größeren Amplituden und einem stärker angenäherten sinusförmigen Verlauf ist zu erkennen, dass ein Gleichspannungsanteil enthalten sein muss³⁶. Bei der Park-Transformation kommt es unter anderem dadurch zu einem Schwingen auf den transformierten Werten. Außerdem ist eine Messwerterfassung bei einmaligem Messen durch die hohen Gradienten der Ströme in den Strängen sehr schwierig, was den geringen Streuinduktivitäten der Transformatoren geschuldet ist. Zum korrekten Erfassen der Ströme sollte innerhalb der Pulsperiode mehrfach gemessen und aus den enthaltenen Messwerten der Mittelwert gebildet, beziehungsweise das VFC-Verfahren nach Quang mit

³⁶ Vgl. dazu auch Abbildung 5-52 und Abbildung 5-54

Interpolationsfilter für die Ströme aus Kapitel 1.4.1.2 angewendet werden. Daraus müsste der Gleichanteil ermittelt werden, welcher anschließend vom Mittelwert der Strommesswerte subtrahiert wird. Das Resultat sind dann Ströme ohne Offset oder falsche Werte von einer Stromspitze, wie sie in Abbildung 5-58 dargestellt sind.

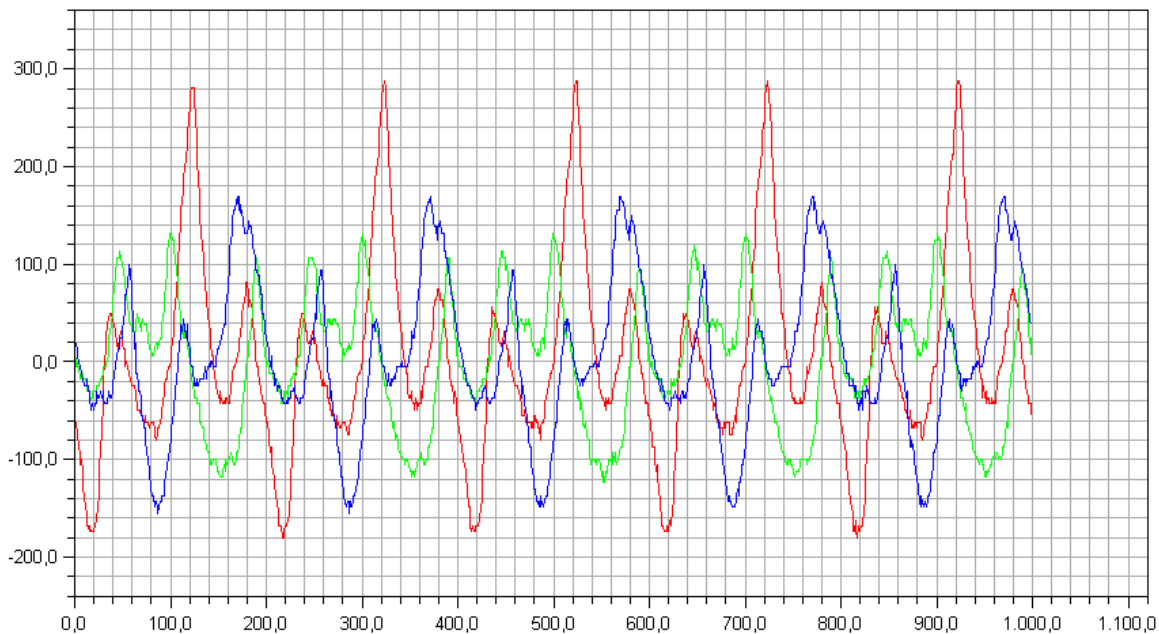


Abbildung 5-60 ausgeregelte Ströme der drei Stränge bei einem Sollwert von 0 A³⁷

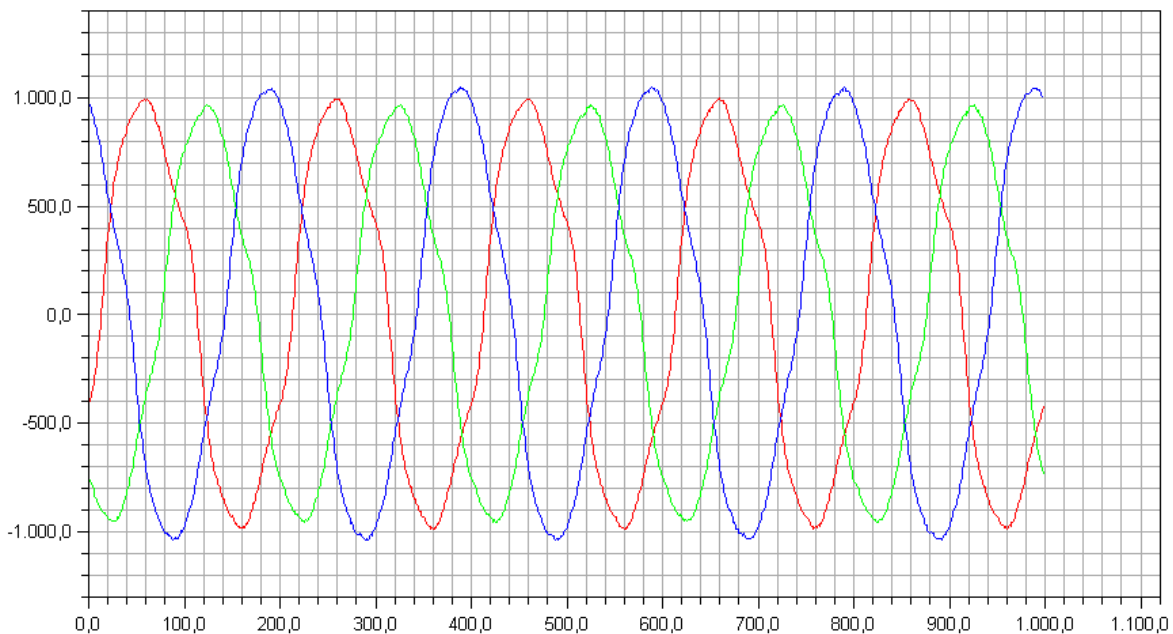


Abbildung 5-61 Ausgeregelte Ströme bei einem Sollwert von 1000

³⁷ [A20] zeigt ein Oszillogramm der Ausregelung von 0 A bei Netzzuschaltung des Wechselrichters ohne Widerstände

Zur Überprüfung der korrekten Arbeitsweise der Messwerteerfassung sowie des PI-Reglers wurde im C-Quelltext ein Sollwert im P-Anteil von 1000 eingestellt, welcher dann über die Widerstände ins Netz abfließt.³⁸ Grund für die Asymmetrien in der Stromhöhe sind die unterschiedlichen Spannungshöhen in den einzelnen Phasen, was im Allgemeinen am Netz liegt sowie an mechanischen Abweichungen im Stelltransformator. Die dabei entstehenden Ströme haben einen gut angenäherten sinusförmigen Verlauf und deren Spitzenwerte sind abgerundeter als jene aus Abbildung 5-54. An den Minimal- und Maximalauslenkungen sieht man, dass der Gleichanteil nicht mehr in den Wechselsignalen enthalten ist. Auf dem Oszilloskop ist aber der sägezahnförmige Verlauf des Stromes noch deutlich zu erkennen und deckt sich mit den Ergebnissen aus Abbildung 5-58.

5.2.2.4 Ausregelung Wechselrichter - Netz auf 0 A

Nach dem erfolgreichen Ausregeln auf 0 A über die Widerstände wird der Wechselrichter nun direkt mit dem Netz verbunden. Dabei zeigt sich in der ersten Hälfte des grünen Kurvenverlaufs der auf 0 A ausgeregelte Strom, in der zweiten Hälfte ein Sollsprung auf 300 mA.

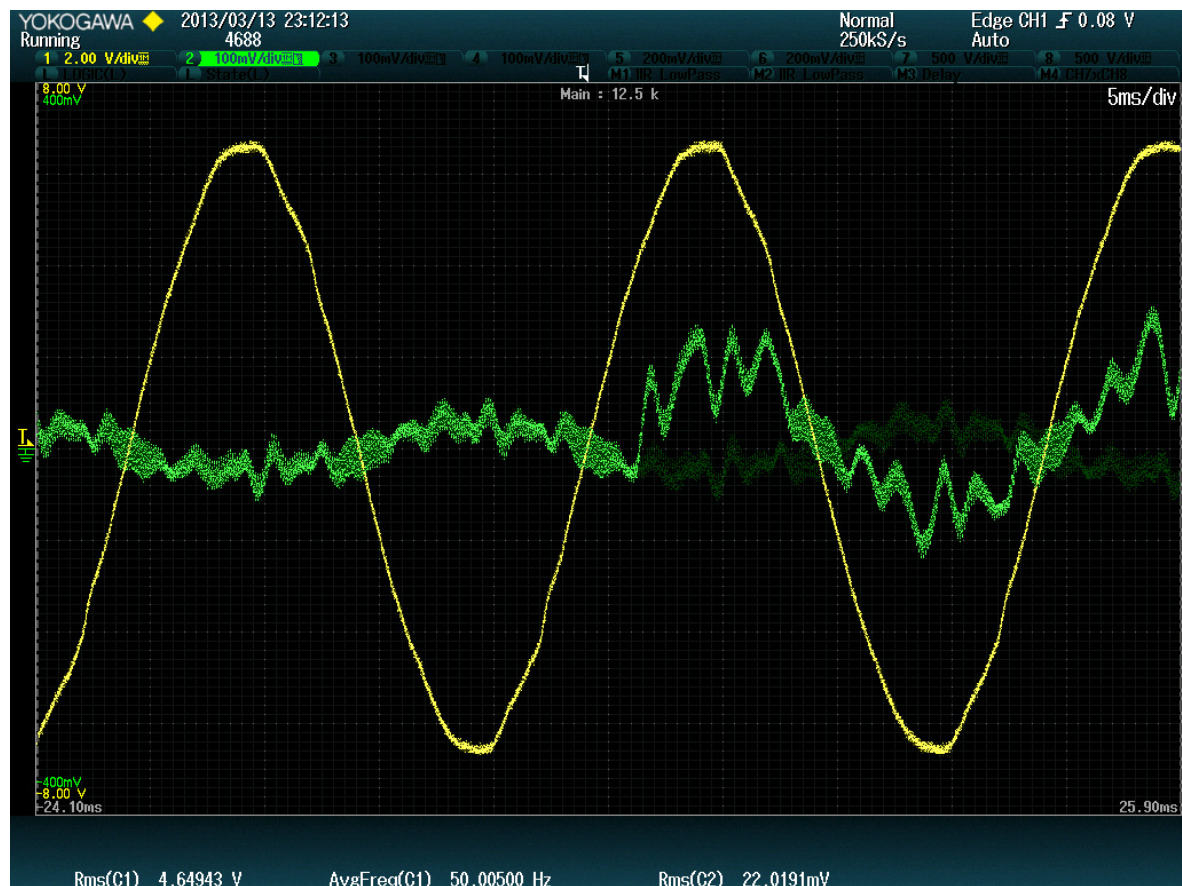


Abbildung 5-62 Ausregelung auf 0 A mit Umschaltung von Widerstand (150 mA) auf Netz (300 mA) – U (gelb) und I (grün) einer Phase

³⁸ Die Widerstände wurden soweit angepasst, dass sich ein Stromfluss von 1000 ergibt. Der Wechselrichter wurde dreiphasig verpolt an das Netz angeschlossen.

Deutlich zu erkennen ist, dass scheinbar bei der Ausregelung auf 0 A ein Strom von ca. 150 mA in den Wechselrichter fließt und bei einer definierten Richtung von +300 mA aus dem Wechselrichter in das Netz.

5.2.2.5 Sprungantwort auf 3 A am Beispiel von I_d

Der Sollwert ist zunächst wieder auf 0 A eingestellt und der Wechselrichter wird mit Regelung direkt am Netz betrieben. Vorgegeben wird ein Sollwertsprung auf 3 A. Die verwendeten Reglerparameter stammen aus den Berechnungen aus Kapitel 5.2.2.1. In Abbildung 5-63 ist rot die Führungsgröße und orange die Istgröße zu sehen. Deutlich erkennt man, dass die Istgröße sehr stark verrauscht ist, beziehungsweise zu starkem Überschwingen neigt. Auch die ausgegebenen Ströme weisen solche starken Störungen auf. Die simulierte Regelung kann demnach in der Praxis nicht so angewendet werden. In weiteren Schritten müsste demnach abgeklärt werden, woher diese Unterschiede zwischen Simulation und Realität stammen. Für weitere Untersuchungen wurden die Reglerparameter auf $K_p = 4$ und $K_i = 1575$ verringert.

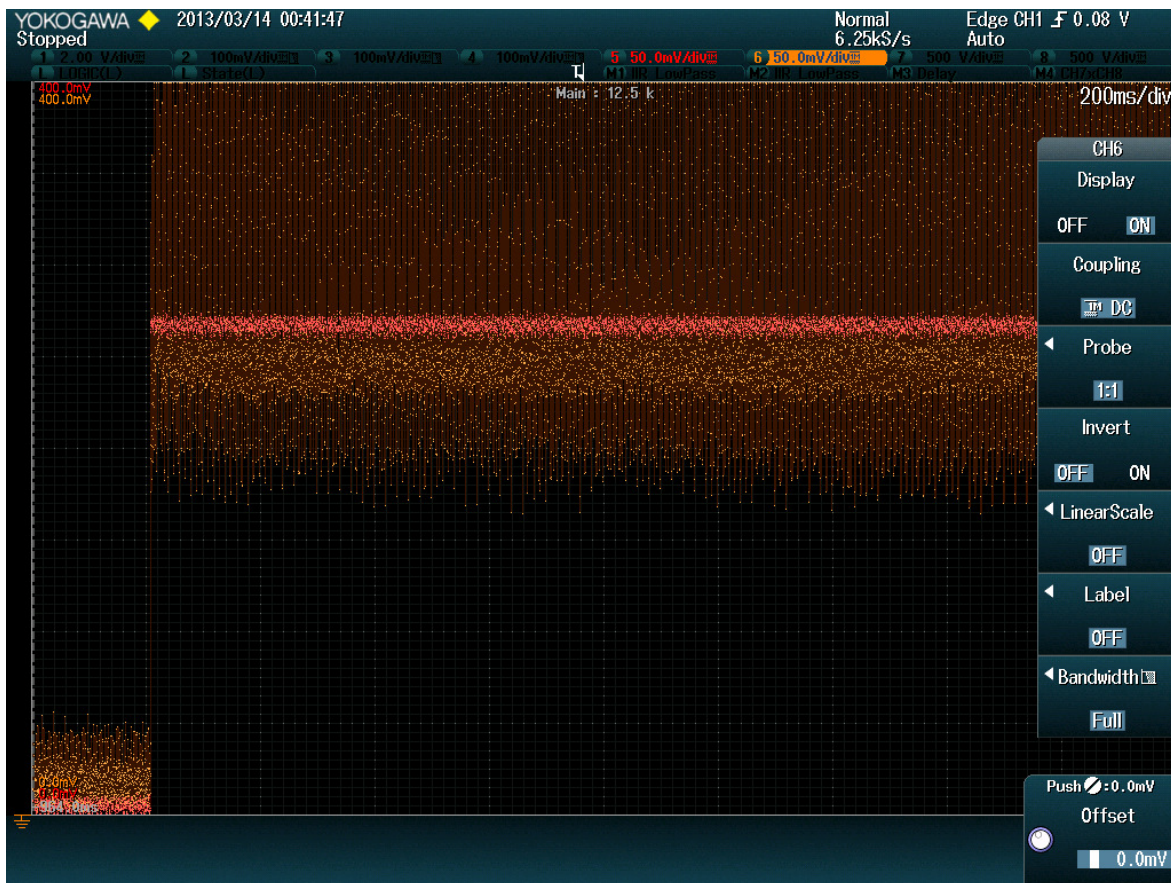


Abbildung 5-63 I_d -soll und I_d -ist von einem Sollwertsprung auf 3 A

Abbildung 5-64 zeigt nun einen zeitlich höher aufgelösten Abschnitt des ausgeregelten Stromes, genauer eine volle Netzperiode. Die grün abgebildete Kurve stellt den Strom zur Netzspannung (gelb) dar, darunter wieder die rot Soll- und die grün Istgröße. Anhand der Istgröße kann man gut erkennen, dass es sich um ein periodisch wiederkehrendes Signal handelt, dessen Ursache noch geklärt werden muss. Es könnten jedoch Störungen aus

dem Gegensystem der symmetrischen Komponenten sein. Scheinbar koppeln sich in den Regelkreis aber mehrere Störgrößen ein. Der Regler versucht diese zu kompensieren. Somit konnte nachgewiesen werden, dass die implementierte Regelung funktionsfähig ist und der Wechselrichter geregelt Strom in das Energienetz abgeben kann. Auch das Verschieben der Phase des Stromes gegenüber der Netzspannung ist mit der Regelung möglich.³⁹



Abbildung 5-64 Ausregelung des Stromes gegenübergestellt zur Netzspannung mit Führungsgröße und Istgröße

5.2.3 Mögliche Störgrößeneinkopplungen

Im Folgenden sollen nun mögliche Einkopplungen von Störgrößen in den Regelkreis vorgetragen werden, die es in weiteren Arbeiten zu untersuchen gilt.

5.2.3.1 Oberwellen des Zwischenkreises

Unter Realbedingungen können sich Abweichungen in der Zwischenkreisspannung durch Abweichungen von einzelnen Bauelementen und anderen Einflüssen ergeben. Die B6U erzeugt unter Belastung Bauarttypische Oberwellen auf der Zwischenkreisspannung. Somit ändert sich die Spannungshöhe des Zwischenkreises fortlaufend und auch in Abhängigkeit der Belastung am Wechselrichterausgang. Um dies zu kompensieren wird der er-

³⁹ Als Nachweis dazu siehe Anhang [A21]

zeugte Eingabewert für die RZM mit dem aktuellen Wert der Zwischenkreisspannung normiert. Sind gezielt Oberwellen auf die Zwischenkreisspannung auf moduliert, so werden diese nicht weitergereicht. Die folgenden zwei Bilder zeigen die oberwellenbehaftete Zwischenkreisspannung sowie der resultierende Strom einer Phase.

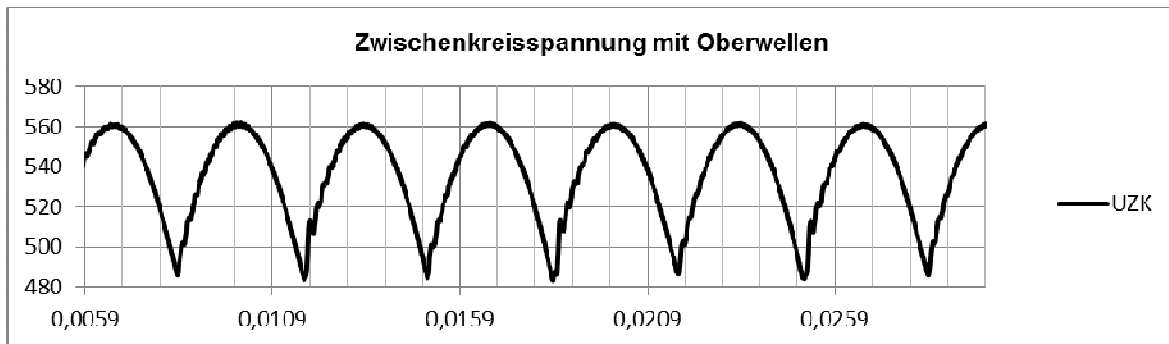


Abbildung 5-65 Oberwellenbehaftete Zwischenkreisspannung des Wechselrichters

Die hieraus errechneten Alpha- und Beta-Werte sind nicht mehr sinusförmig, könnten aber unter günstigen Umständen über eine genügend große Induktivität gute sinusförmige Ströme einspeisen.

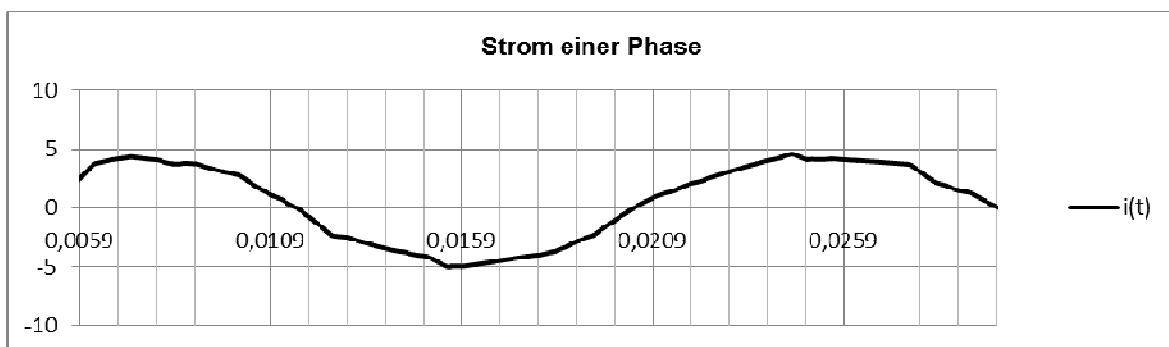


Abbildung 5-66 Ausgangsstrom des Wechselrichters bei Normierung mit aktueller Zwischenkreisspannung

Wird eine Berechnung mit den aktuellen Werten des Zwischenkreises angestrebt, so wird es nur schwer möglich sein, auf den Zwischenkreis aufmodulierte Oberwellen ins Netz einzuspeisen. Als Annahme sei folgendes vorausgesetzt, die Oberwellen in Abbildung 5-65 sind in der Zwischenkreisspannung enthalten und von ihr wird der arithmetische Mittelwert gebildet. Wie man sieht, kann dieser unter dem Gleichrichtwert einer B6U liegen.

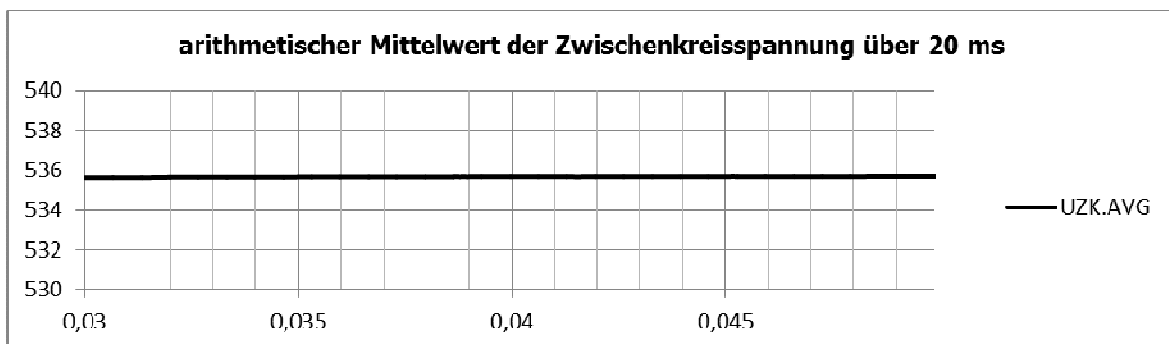


Abbildung 5-67 gemittelte Zwischenkreisspannung des Wechselrichters

Die mit dieser Methode erzeugten Ströme weisen deutlich das Muster der Oberwellen aus Abbildung 5-65 auf. Demzufolge können so auch direkt auf modulierte Oberwellen in das Netz eingepreßt werden.

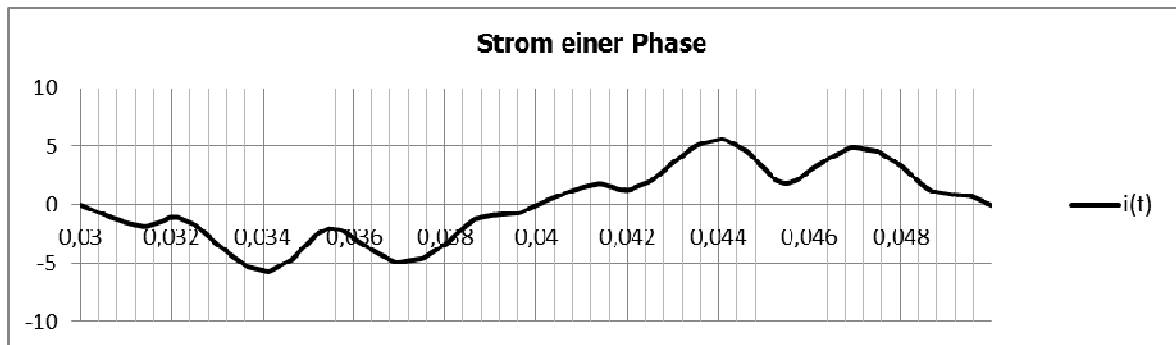


Abbildung 5-68 Ausgangsstrom des Wechselrichters bei Normierung mit gemittelter Zwischenkreisspannung

Als eine weitere Ursache für eine oberwellenbehaftete Einspeisung der Ströme kann die Form der Eingangsfunktion der Netzspannungen angesehen werden. Die aus der Netzspannung berechneten Alpha- und Beta-Werte sind mit Oberwellen belegt, jene aus der Simulation sind dagegen ideale Sinuswellen. Dies ist eine Begründung für einen nicht ideal sinusförmigen Stromverlauf, da der Wechselrichter in erster Linie das Netz nachbilden möchte und für die Formung der Ströme ist allein der Regler zuständig.

5.2.3.2 Störungen in der Netzspannung

Auf dem statischen Anteil der Raumzeigermodulation werden direkt die Störungen der Netzspannung mit aufgeprägt, wie es auch schon aus der Abbildung 5-47 im Kapitel 5.1 hervorging. Es könnte versucht werden, ob eine direkte Erzeugung des statischen Anteils der Raumzeigermodulation aus dem zu Beginn ermittelten Zeiger vor dem Transformator durch eine Park-Rücktransformation zu besseren Ergebnisse führt als das aktuell angewendete Verfahren.

5.2.3.3 Störungen bei der Stromistwerterfassung

Es wurde bereits an mehreren Stellen der Arbeit erwähnt, dass an der Stromistwerterfassung zwingend Verbesserungen vorgenommen werden müssen. Derzeit arbeitet der A/D-Wandler im Bereich von 20% Auslastung bei maximalem Strom. Für die Anwendung dieses, in der Arbeit entwickelten, Wechselrichters werden vom maximal möglichen Eingangswert des A/D-Wandlers nur 5,71%⁴⁰ ausgenutzt. Durch die zu kleinen Glättungsinduktivitäten kommt es weiterhin zu Stromanstiegen mit sehr großen Gradienten. Es wird nun folgendes vorgeschlagen:

- Verbesserung der Stromistwerterfassung in einen höheren Bereich des A/D-Wandlers

⁴⁰ Maximaler Stromwert 3,5 A

- Vergrößerung der Glättungsinduktivitäten
- mehrere Messwerterfassungen in einem Taktzyklus – VFC-Verfahren

5.2.3.4 Störungen durch Gegensysteme auf den Park-Transformierten des Stromes

Es wird angenommen man hat drei ideale, sinusförmige, um 120° versetzte Signale für den Eingang der Clarke-Transformation. Ohne Phasenversatz ist ein weiteres System, mit den zuvor genannten Eigenschaften, aufmoduliert. Seine Parameter betragen 10% der Amplitude und die dreifache Frequenz des ersten Systems. Die Parktransformierte aus diesen beiden Systemen weist eine sinusförmige Schwingung von der doppelten Frequenz des ersten Systems auf. Des Weiteren beträgt der Gleichrichtwert der sinusförmig schwingenden Parktransformierten nur noch +5% von dem Wert, der sich ohne das überlagerte System ergibt. Die Auslenkung von Spitzenwert zu Spitzenwert auf der überlagerten Parktransformierten beträgt 10%. In Abbildung 5-69 ist das beschriebene Verhalten dargestellt.

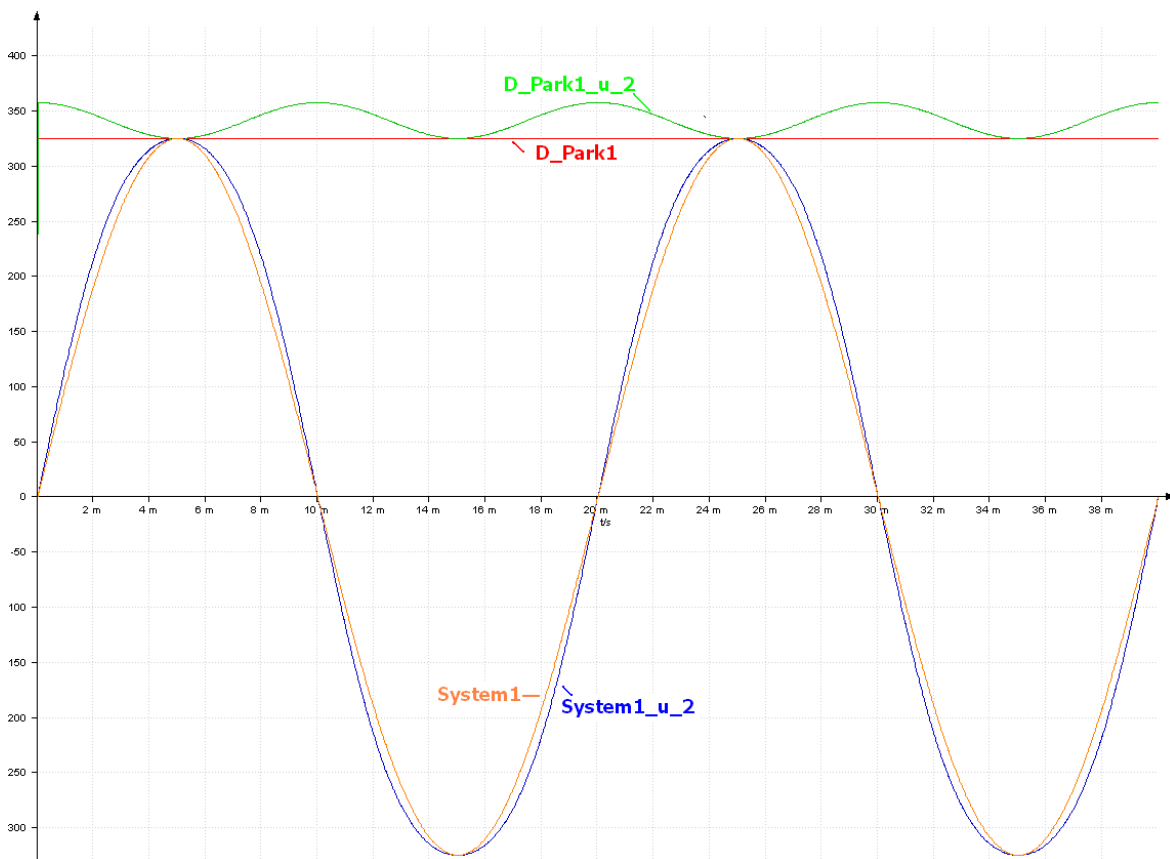


Abbildung 5-69 Parktransformation mit und ohne Gegensystem von $3 \cdot f_0$

Nähere Untersuchungen sollten in weiteren Arbeitsschritten durchgeführt werden, denn die erhaltene Ist-Größe entspricht nicht der eigentlich gewünschten, also der Grundschwingung. Es ist eine Summation aus beiden Anteilen. Um gezielt Frequenzen regeln zu können muss die Parktransformierte in die einzelnen enthaltenen Komponenten zerlegt werden.

5.3 Auswertung und Zusammenfassung

Im Allgemeinen konnte gezeigt werden, dass die Grundidee der selbstständigen Diagnose des Wechselrichters funktioniert. Ein Verkabelungsfehler von Phasen zwischen Netz und Wechselrichter sowie der Falschanschluss von Messgeräten an den A/D-Wandler kann vom DSP überprüft und ausgewertet werden. Allerdings konnte die Stromwandlerdiagnose nicht validiert werden, da sich bei der Istwerterfassung Änderungen ergeben haben. Gerade bei kleinen Messwerten ergibt sich nun ein erhöhter Fehler bei deren Erfassung. Die erhaltenen Ergebnisse stimmen im Wesentlichen mit denen aus den Simulationen überein. Ein Vertauschen der Phasen zwischen Wechselrichter und Netz lässt sich eindeutig und sicher über den Effektivwert des Stromes detektieren. Bei korrektem Anschluss ist der erhaltene Effektivwert deutlich kleiner, als bei einem fehlerhaften Aufbau. Liegen keine Fehler beim Verbinden an das Netz vor, so sollte als nächstes der Drehwinkel überprüft werden. In der Praxis bereitet dies allerdings einige Schwierigkeiten. Betrachtet man noch einmal die Bilder dazu, so fällt auf, dass in Bereichen mit niedriger Einspeisung ein überlagertes Schwingen auf dem Raumzeiger des Stromes deutlich hervorgehoben wird. Dadurch erschwert sich die Auswertung zusätzlich. Das Schwingen wird hauptsächlich durch die unregelmäßige Einspeisung sowie die Asymmetrien im Netz und zusätzliche Toleranzen des Transformators hervorgerufen. Bei einer größeren Stromeinprägung glättet sich der Verlauf des Drehwinkels, gut zu erkennen bei der dreiphasigen Falscheinpeisung.

Die geregelten Ströme weisen gegenüber den gesteuerten Strömen über den Widerständen größere Oberwellenanteile auf. Der Fehler muss hauptsächlich im dynamischen Anteil der RZM-Komponenten gesucht werden. Zum einen sollte als erstes eine verbesserte Stromistwerterfassung erprobt werden. Im Weiteren kann daraufhin untersucht werden, wie Komponenten des Gegensystems aus dem Mitsystem entfernt, kompensiert oder auch geregelt werden können. Danach könnte untersucht werden, in wie weit sich die Zwischenkreisspannung des Wechselrichters auf die Stromeinspeisung und dessen Welligkeit auswirkt. Weiterhin kann man auch erproben, den statischen Anteil der RZM aus der inversen Parktransformation des Spannungszeigers vor dem Stelltransformator zu erzeugen, ähnlich wie es bereits in den Funktionen der Inbetriebnahme realisiert worden ist. Nachfolgende Abbildung kennzeichnet noch einmal die genannten Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen.

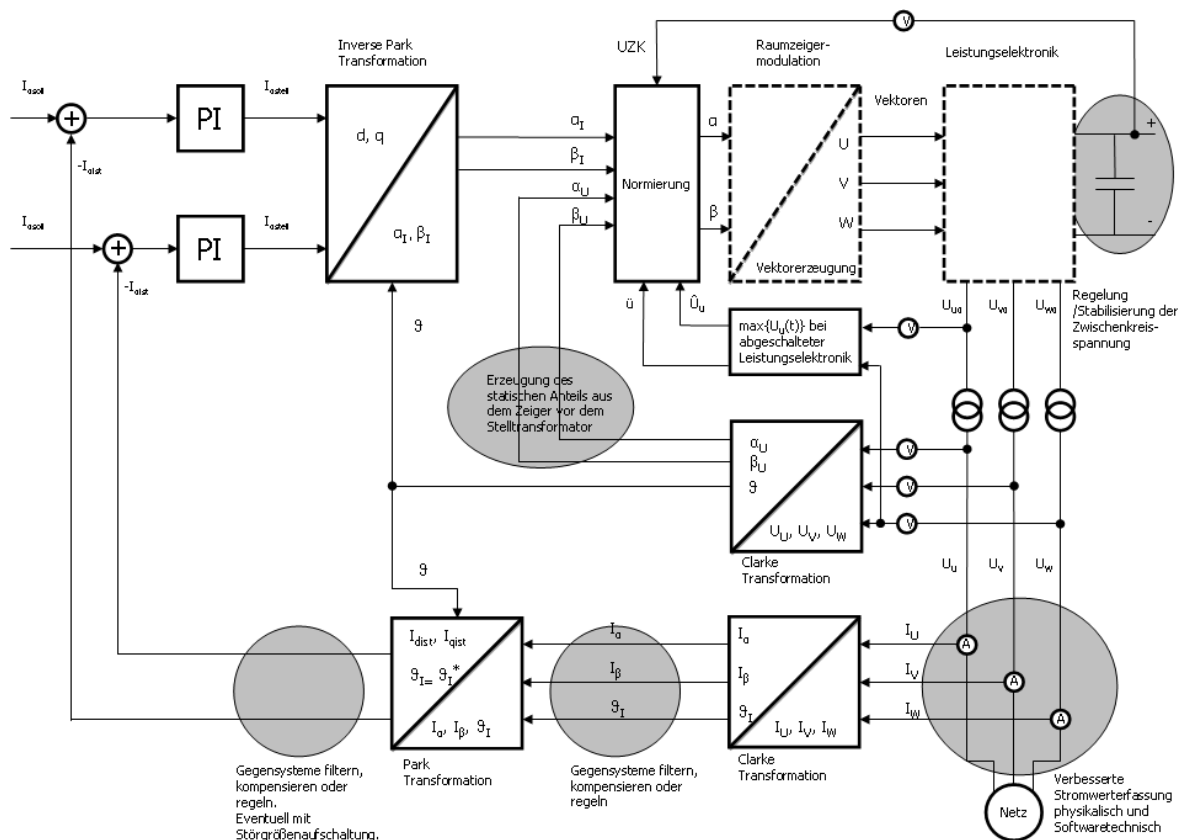


Abbildung 5-70 Übersichtsbild der Softwaremodule des Wechselrichters mit Ansatzpunkten für Verbesserungen der Hard und Software⁴¹

⁴¹ vergrößerter Übersichtsplan im Anhang unter [A22]

6 Zusammenfassung und Ausblick

Für Ausbildung und Forschung sollte die Grundfunktion eines Wechselrichters realisiert werden. Es war vorgegeben, dass der Wechselrichter mit dem Verfahren der Raumzeigermodulation arbeiten soll. Alle Softwaremodule sollten für eine Weiternutzung modular programmiert werden, sodass sie auch für weitere Anwendungen im Bereich der Forschung und Ausbildung genutzt werden können. Zudem erforderte die beabsichtigte Nutzung des Wechselrichters die Erarbeitung eines Sicherheitskonzepts in Verbindung mit einer Erweiterung der Hardware. Für die Regelung des Einspeisestromes wurde eine PI-Regelung anhand des Theorieansatzes der feldorientierten Regelung für Asynchronmaschinen als Grundlage genommen und auf die vorliegende Problematik angepasst.

Zunächst einmal wurden die theoretischen Grundlagen zur Berechnung der nötigen Eingangswerte der Raumzeigermodulation erarbeitet. Als wichtig gelten hier die Clarke- und die Park-Transformation. Die nötigen Grundlagen zum Entwurf eines Stromreglers mittels des Bode-Stabilitätskriteriums wurden ebenfalls erarbeitet. Der vorgegebene Testaufbau von Wechselrichter und Stelltransformator sowie die Messeinrichtung weisen spezielle physikalische Charakteristiken auf, welche für eine Regelung von essentieller Bedeutung sind. Eine Analyse und Messung des zu regelnden Systems wurde durchgeführt. Nachdem alle Grundlagen erarbeitet wurden sowie das zu regelnde System bekannt war wurde alles in der Simulationssoftware „*Portunus*“ nachgebildet.

Zunächst einmal ging es darum, zu klären, ob die notwendigen Berechnungen in vereinfachter Form, wie es für den Betrieb von symmetrischen Verbrauchern ausreichend ist, auch für den Netzbetrieb durchgeführt werden können. In Simulationen hat sich ergeben, dass bei Unsymmetrien Abweichungen gegenüber den tatsächlichen Größen entstehen und für den Wechselrichterbetrieb ungeeignet sind. Darauf aufbauend wurde das System des Wechselrichters nachgebildet und anhand dessen schließlich das Sicherheitskonzept für die Inbetriebnahme erarbeitet. Da auch eine Ausbildung an dem technischen Aufbau sowie deren Grundlagen, welche hier im Weiteren umgesetzt wurden, erfolgen soll, war es von großer Wichtigkeit, dass Schäden an Mensch und Gerät vermieden werden müssen. Der DSP ist darum in der Lage einen fehlerhaften Aufbau zu erkennen. Der Programmablauf wird bei einem Fehler gestoppt. Nachdem eine Abklärung über die Vorgehensweise der Berechnungsschritte stattfand, wurde das Gesamtsystem in Simulation nachgebildet. Es diente als Grundlage für die Herstellung der Grundfunktionen für die NetZRückspeisung sowie zum Überprüfen der Reglereinstellungen.

Nach dem Analysieren und Ausmessen der Regelstrecke, bestehend aus Transformator, Wechselrichter und Messwerterfassung, konnte eine Parametrierung des PI-Reglers erfolgen. In der Praxis verwendet man dazu oft das Bode-Stabilitätskriterium und legt den Regler anhand dessen aus, was hier auch erfolgt ist.

Darauffolgend fand die Implementierung der Berechnungsverfahren in der Programmiersprache C statt. Vorgabe war hier eine Verwendung des Zahlenformates Integer. Die Wahl fiel dabei auf eine Festkommaarithmetik im Zahlenformat Qn.m. Eine Festkommaarithmetik erfordert beispielsweise bei der Multiplikation von zwei Zahlen eine Anpassung des Ergebnisses. Es war also nötig, eine Programmbibliothek für Rechenoperationen zu entwickeln, in welcher die Grundrechenarten sowie das Negieren von Zahlen enthalten sind. Bei Bedarf weiterer benötigter Rechenoperationen ist die Bibliothek entsprechend zu erweitern, denn der jetzige Stand beinhaltet nur die für diese Arbeit benötigten Funktionen. Das im Simulationsprogramm erarbeitete Inbetriebnahmekonzept wurde umgesetzt und erfolgreich getestet. Die vom 16-Bit-A/D-Wandler übermittelten Daten mussten jeweils für Strom und Spannung auf das signed-Integer-Qn.m-Zahlenformat angepasst werden. Für die Bibliotheken der Park- und Clarke-Transformation existieren zwei Varianten. Die vollständige und die vereinfachte Transformationsvorschrift. Somit ist die Bibliothek auch für symmetrische Verbraucher, also auch zum Ansteuern eines Asynchronmotors, anwendbar. Der programmierte PI-Regler wurde ebenfalls so gestaltet, dass er auch für die Kompensation von Oberwellen verwendet werden kann, so wie es für zukünftige Weiterentwicklungen vorgesehen ist. Eine Überwachung der Ströme I_d und I_q ist ebenfalls mit implementiert worden. Steigt einer der Ströme auf einen unzulässig hohen Wert an, so wird die Freigabe weggenommen und der Wechselrichter über die Relais vom Netz getrennt.

Bei der Auswertung ergaben sich Abweichungen zwischen Simulation und Messung. Der in Simulation entwickelte Inbetriebnahmealgorithmus kann für die Hardware im derzeitigen Zustand nicht vollständig genutzt werden. Bei korrektem Anschluss des Wechselrichters an das Versorgungsnetz sind die über die Widerstände eingespeisten Ströme in ihrer Höhe sicher messbar, jedoch aber kann es beim Drehwinkel zu Problemen kommen. Im Allgemeinen sollte die Stromistwerterfassung überarbeitet und verbessert werden. Möglichkeiten bieten sich dabei zum einen in der Verbesserung des verwendeten Messverfahrens. Aber auch eine Glättung der Ströme mittels Drosseln ist denkbar. Zum sicheren Feststellen des korrekten Anschlusses des Wechselrichters an das Versorgungsnetz kann auch die Verwendung kleinerer Widerstände hilfreich sein. Ein geeigneter Wert dafür wäre $100\ \Omega$. Tritt kein Fehler auf ist mit Strömen über $0,5\text{ A}$ und unter 1 A zu rechnen und im Fehlerfall wird der Maximalstrom des Transformators von 5 A nicht überschritten. Im Wechselrichterbetrieb am Netz zeigte sich, dass die eingespeisten Ströme keinen sinusförmigen Verlauf aufweisen. Dagegen wurde eine gute sinusförmige Formung der Ströme beim direkten Speisen auf eine Asynchronmaschine erreicht. Es sind also in weiterführenden Arbeiten die Störquellen zu identifizieren und gegebenenfalls zu eliminieren. Mögliche Ansatzpunkte wurden im Kapitel 5.2.3 ausführlich erörtert. Darüber hinaus könnte sowohl die Qualität der Zwischenkreisspannung verbessert werden, als auch – wie schon oft erwähnt – die Stromistwerterfassung. Da man im Allgemeinen Unsymmetrien und nicht sinusförmigen Signalen vorfindet, kann es auch sinnvoll sein, das Gegensystem der symmetrischen Komponenten näher zu untersuchen. Eine Filterung der transformierten Istgröße oder eine Störgrößenaufschaltung auf die Regelung könnte ebenfalls zu Verbesserungen der Regelgröße führen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Abarbeitung des Programms in einem festen definierten und garantierten Zyklus. Dazu muss, wie in Kapitel 1.4 erwähnt, der Regelalgorithmus vom restlichen Programmteil entkoppelt und separat für die Regelaufgabe abgearbeitet werden. Die derzeitige Umsetzung sieht das in dieser Form nicht vor.

Zur Zeit ist ausschließlich eine Bedienung über den PC und die Software von *Analog Devices* möglich. Allerdings ist bereits bekannt, dass ein Display und Eingabeelemente hinzugefügt werden sollen. Eine möglicherweise sinnvolle Ergänzung wäre eine Menüführung mit Einstellmöglichkeiten des Reglers.

Eine für den Betrieb des Wechselrichters sicherheitsrelevante und dringend benötigte Überwachung aller drei Phasen nach DIN V VDE V 0126-1-1 (Februar 2006) muss noch entwickelt und implementiert werden. Es ist von äußerster Wichtigkeit, dass beim Ausfall eines Messgerätes beziehungsweise beim Wegfall einer Phase der Wechselrichter seinen Betrieb sofort einstellt, wenn eine andere Norm nicht greift und der Wechselrichter eventuell Kurzschlussleistung liefern muss. Softwaretechnisch muss darauf geachtet werden, dass die Raumzeigermodulation erst gestoppt werden darf, wenn der Benutzer die Freigabe weggenommen hat. Würde die Raumzeigermodulation angehalten, so bleibt der letzte eingestellte Vektor an den Transistoren geschaltet. Dabei kommt es zu Strömen, die außerhalb der Nennparameter der Leistungselektronik und des Stelltransformators liegen. Außerdem müssen elektrische Schutzeinrichtungen anspringen, um eine Zerstörung der Betriebsmittel zu verhindern. Diese Tatsache stellt ein Gefährdungspotential dar und muss durch das Einbringen einer geeigneten Schutzeinrichtung⁴² ausgebessert werden.

⁴² Leitungsschutzschalter mit Z-Charakteristik – ausgelegt für den maximalen Strom des Wechselrichters

7 Literatur

- [Bmbf2009] Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung, August 2009 URL: <http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf>, verfügbar am 10.10.2012
- [Busc2009] Peter Busch: Elementare Regelungstechnik, 7. Aufl. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2009
- [Föll1990] Otto Föllinger: Regelungstechnik, 6. Auflage, Heidelberg: Hüthig Buch Verlag GmbH, 1990
- [Geer1990] Hans P. Gering: Meß- und Regelungstechnik, 2. Aufl. Berlin: Springer, 1990
- [Jörg1994] H. P. Jörgl: Repetitorium Regelungstechnik Band 2, 1. Aufl. München: Oldenbourg Verlag, 1994
- [Jörg1995] H. P. Jörgl: Repetitorium Regelungstechnik Band 1, 2. Aufl. München: Oldenbourg Verlag, 1995
- [Park1929] Robert H. Park: American Institute of Electrical Engineers, S. 716 - 727, July 1929 URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/4763772/5055268/05055275.pdf>>, verfügbar am 18.09.2012
- [Quan1993] Nguyen Phung Quang, Praxis der feldorientierten Drehstromregelungen, 1. Aufl., Böblingen: expert-Verlag, 1993
- [RIEF2000] Ulrich Riefenstahl: Elektrische Antriebstechnik Leitfaden der Elektrotechnik, 1. Aufl. Stuttgart – Leipzig: B.G. Teubner, 2000
- [SCHU2004] Dr.-Ing. Detlef Schultz: Netzurückwirkungen – Theorie, Simulation, Messung und Bewertung, 1. Aufl. Berlin-Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2004

- [Texa1998] Applikationsschrift BPRA073, Texas Instruments Europe, 1998.
URL:
<<http://www.ti.com/lit/an/bpra073/bpra073.pdf>>, verfügbar am
12.10.2012
- [Vale2006] Crastan Valentin: Elektrische Energieversorgung 1, 2.Aufl. Berlin:
Springer, 2006
- [Vich1963] Robert Vich: Z-Transformation Theorie und Anwendung, 1.Aufl.
Berlin: VEB Verlag Technik, 1963

8 Anhang

[A1]	verbauter Transformator im Laborstellnetzteil der Firma Preussler GmbH.....	89
[A2]	Messungen und Ermittlung der Transformatorersatzschaltbildelemente	89
[A3]	Messprotokoll zweite Ausmessung des Transformators.....	96
[A4]	Messprotokoll Ausmessung des Trenntransformators	98
[A5]	Park-Transformation und inverse Park-Transformation für symmetrische Systeme 101	
[A6]	Übersichtstafel Funktionsweise des Wechselrichters.....	102
[A7]	Bode-Diagramm offene Regelstrecke aus Wechselrichter und Transformator..	102
[A8]	Bode-Diagramm der Strecke nach dem Betragsoptimum	104
[A9]	Bode-Diagramm Regelstrecke mit Trenntransformator und zweite Stelltransformatormessung	105
[A10]	Bode-Diagramm Regelstrecke mit Trenntransformator und zweite Stelltransformatormessung nach dem Betragsoptimum	106
[A11]	Clarke transformierte Spannungen Alpha, Beta und Theta um ca. 14 Uhr	107
[A12]	Clarke transformierte Spannungen Alpha, Beta und Theta um ca. 20 Uhr	107
[A13]	Ströme UVW über Widerstände von 330 Ohm bei RZM ohne fehlerhaften Anschluss.....	108
[A14]	Oszillograf_1 von Netzspannung und Umrichterspannung Versuchsaufbau 1 ..	109
[A15]	Oszillograf_2 von Netzspannung und Umrichterspannung Versuchsaufbau 1 ..	109
[A16]	Oszillograf_3 Umrichterspannung RMS Versuchsaufbau 1.....	110
[A17]	Oszillografie 2 Phasen falsch angeschlossen, gesteuerter Betrieb über R.....	110
[A18]	Oszillografie 3 Phasen falsch angeschlossen, gesteuerter Betrieb über R.....	111

[A19]	Oszillografie gelb U, grün I, rot Sollwert d-Anteil, orange Istwert d-Anteil.....	111
[A20]	Oszillografie gelb U, grün I, Ausregelung auf 0 A Iststrom ca. 150 mA	112
[A21]	Oszillografie gelb U, grün I, Ausregelung einen Leistungsfaktor von 0.85	112
[A22]	Übersichtstafel Funktionsweise des Wechselrichters mit Verbesserungsmöglichkeiten.....	113

[A1] verbauter Transformator im Laborstellnetzteil der Firma Preussler GmbH Produktdetail

Bezeichnung: 115DF 230V 50-400Hz / 0-230/115V 5,0A

Artikelnummer: 61-200115-005

Einphasen-Ringstellsparttransformator nach VDE0552

- Mit Mittelanzapfung (Summenstrom=Nennstrom)

- Dreipunktbefestigung nach Serie 684

- Handantrieb fußregelnd, Welle D6mm 30mm lang ab Auflage

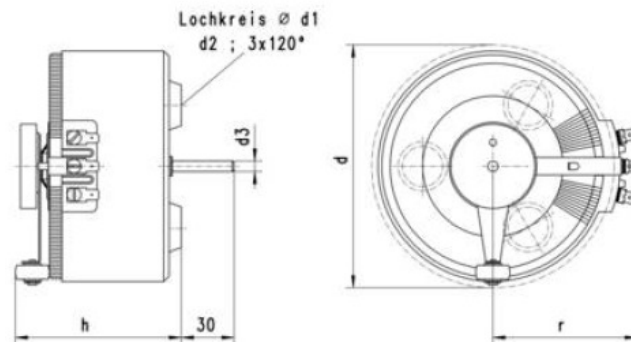
- Flachsteckanschluss 6,3x0,8mm

Spannungs-Eingänge

1x 230V 5.50A 50-60Hz

Spannungs-Ausgänge

1x 0-230/115V 5.00A



Abmessung

(alle Werte in mm)

d	d1	d2	d3	h	r
135,00	80,00	6,00	6,00	95,00	83,00

Zubehör:

[Drehknopf K60-6](#)

[Drehknopf K90-6](#)

Medien-Downloads:

keine Dateien vorhanden



Artikelnummer:	61-200115-005
Spannungs-Eingänge	1x 230V 5.50A 50-60Hz
Spannungs-Ausgänge	1x 0-230/115V 5.00A
Bauleistung:	1.150 VA
Schaltgruppe:	Ia0
Schutzklasse:	I
Isolationsklasse:	T40B
Schutzart:	IP00
Umgebungstemperatur:	min 0 °C / max 40 °C
MTBF:	30.000 h
Kupfergewicht:	0,37 kg
Gewicht:	4,20 kg
Baugröße:	115DF
Produktsérie:	Serie 684
Lieferzeit:	4 AT
Bruttopreis:	182,80 EUR +CuTZ +MwSt

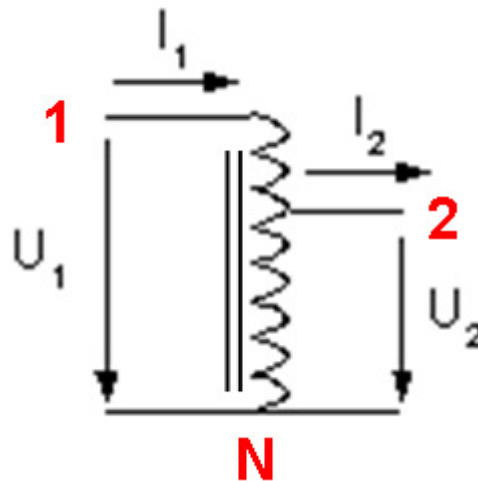
Möller-Preussler GmbH, Gutenbergring 55a, 22848 Norderstedt

Tel. 0049/40/534 20-0 / Fax 0049/40/534 20-40

www.moeller-preussler.de / info@moellerpreussler.de

[A2] Messungen und Ermittlung der Transformatorersatzschaltbildelemente

Im anschließenden Bild wird die Anschlussbelegung des Spartransformators gezeigt und werden im weiteren als Indizes benutzt.



Zuerst wurden die Werte der Längselemente mit einem Ohmmeter und einem Induktivitätsmessgerät ermittelt und sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Der Messvorgang wurde wie folgt durchgeführt:

- Ein Übersetzungsverhältnis wurde am Steller des Trafos eingestellt
- Durch reiben am Graphitabnehmer wurde der Kontaktwiderstand am Anschluss 2 verringert
- Messung an R_{1N} , R_{2N} und R_{12} durchführen
- Messung der Induktivität analog zur Widerstandsmessung

WIDERSTÄNDE				
\ddot{u} in %	R_{1N} in Ω	R_{2N} in Ω	R_{12} in Ω	$R_{1N}=R_{12}+R_{2N}$ in Ω
94,0	3,67	3,89	0,25	4,14
89,2	3,67	3,48	0,42	3,9
80,0	3,67	3,04	0,76	3,8
70,1	3,67	2,74	1,17	3,91
61,0	3,67	2,42	1,55	3,97
52,3	3,67	2,16	1,97	4,13
32,5	3,67	1,34	2,78	4,12
2,6	3,67	0,1	3,7	3,8
$\ddot{u} = R_{2N} / R_{1N}$				$R_{1N} = R_{12} + R_{2N}$

Der gesamt Kupferwiderstand liegt bei 3,67 Ohm, die Werte in der letzten Spalte der Tabelle entstehen aus den Messwerten R_{2N} und R_{1N} . Die sich daraus ergebenden Differenzen sind durch die Kontaktwiderstände am Graphitabnehmen zu erklären.

INDUKTIVITÄT				
ü in %	L _{1N} in H	L _{2N} in H	L ₁₂ in H	L _{1N} =L ₁₂ ^{0,5} +L _{2N} ^{0,5} in H
99,5	1,03	1,02	0,00003	1,027
90,3	1,03	0,84	0,0091	1,012
81,3	1,03	0,68	0,04	1,025
71,7	1,03	0,53	0,09	1,028
61,5	1,03	0,39	0,17	1,037
52,1	1,03	0,28	0,24	1,019
31,2	1,03	0,1	0,49	1,016
0,3	1,03	0,00001	1,03	1,018
$\ddot{u} = \frac{\sqrt{L_{2N}}}{\sqrt{L_{1N}}}$				$L_{1N} = \sqrt{L_{12}} + \sqrt{L_{2N}}$

Bei der Induktivität L_{1N} ist eine geringere Abweichung bei den unterschiedlichen Übersetzungen zu erkennen. Eine Erhöhung des Kontaktwiderstandes hat keine Auswirkungen auf die Induktivität. Die geringen Abweichungen können unter anderem durch die unterschiedlichen Messbereiche begründet werden. Für den gewünschten Arbeitsbereich von 70% sind diese klein genug um vernachlässigt zu werden.

Zur Berechnung der Längskomponenten musste eine Kurzschlussmessung durchgeführt werden. Hierfür wurden einmal die Verbindungen 1 und N kurzgeschlossen und von 2 und N eingespeist und zur Verifizierung einmal 2 und N kurzgeschlossen und von 1 und N eingespeist.

Kurzschluss an 1-N, Einspeisung an 2-N							
ü in %	U _{K_2N} in V	I _{K_2} in A	P _{K_2N} in W	Q _{K_2N} in Var	I _{K_1} in A	LS' _{2N} in mH	R _{Cu'} _{2N} in Ω
94,6	2,5	5,04	12,6	2,15	4,77	0,30	0,55
83,8	4,1	5,05	18,3	9,8	4,23	1,74	1,02
70,4	6,68	5,13	27,5	20,1	3,61	4,91	2,11
61,8	7,26	5,03	27,6	24,1	3,11	7,93	2,85
50,6	7,81	5,08	28,4	27,1	2,57	13,05	4,30
30,9	6,26	5,18	24,3	20,6	1,6	25,59	9,49

Kurzschluss an 2-N, Einspeisung an 1-N							
ü in %	U _{K_1N} in V	I _{K_1} in A	P _{K_1N} in W	Q _{K_1N} in Var	I _{K_2} in A	L _{s_1N} in mH	R _{Cu_1N} in Ω
100,0	0,93	5,19	4,7	0,97	5,19	0,11	0,17
92,9	3,33	5,11	16,6	3,9	5,5	0,48	0,64
83,2	7,17	5,1	32,4	16,8	6,13	2,05	1,25
71,3	12,4	5,03	50,3	37,2	7,05	4,68	1,99
60,8	13,6	3,24	34	28,2	5,33	8,54	3,24
50,8	16,8	2,64	33	29,9	5,2	13,65	4,73
31,1	23,1	1,66	30,2	23,5	5,33	27,12	10,96
1,1	185,7	0,06	10,6	5,4	5,7	4770,99	2944,44

Allgemein gelten für die Berechnung der Ersatzelemente folgende Formeln:

$$\ddot{u} = \frac{I_{\text{Primär}}}{I_{\text{Sekundär}}}$$

$$L_S = \frac{Q_{\text{Primär}}}{I_{\text{Primär}}^2} \cdot \omega$$

$$R_{Cu} = \frac{P_{\text{Primär}}}{I_{\text{Primär}}^2}$$

$$L_{S_Sekundär}' = \frac{L_{S_Sekundär}}{\ddot{u}^2}$$

$$R_{Cu_Sekundär}' = \frac{R_{Cu_Sekundär}}{\ddot{u}^2}$$

Welche Seite des Transformators als Primär- und welche als Sekundärteil verwendet wird ist abhängig von der Definition. Anhand der Messwerte kann der Transformator für beide Seiten berechnet werden. Die Messungen wurden bei einem Primärstrom von 5A durchgeführt. Unterhalb von 50% treten zu große Abweichungen gegenüber der Multimetermessung auf. Diese Ergebnisse sind mit Bedacht zu gebrauchen.

Um die Querelemente, Hauptinduktivität und Eisenwiderstand, eines Transformators zu ermitteln, muss eine Leerlaufmessung vorgenommen werden. Dazu wurde zwischen den Anschlüssen 2 und N eingespeist. Die Anschlüsse 1 und N wurden offen gelassen. Die Messergebnisse sind aus der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

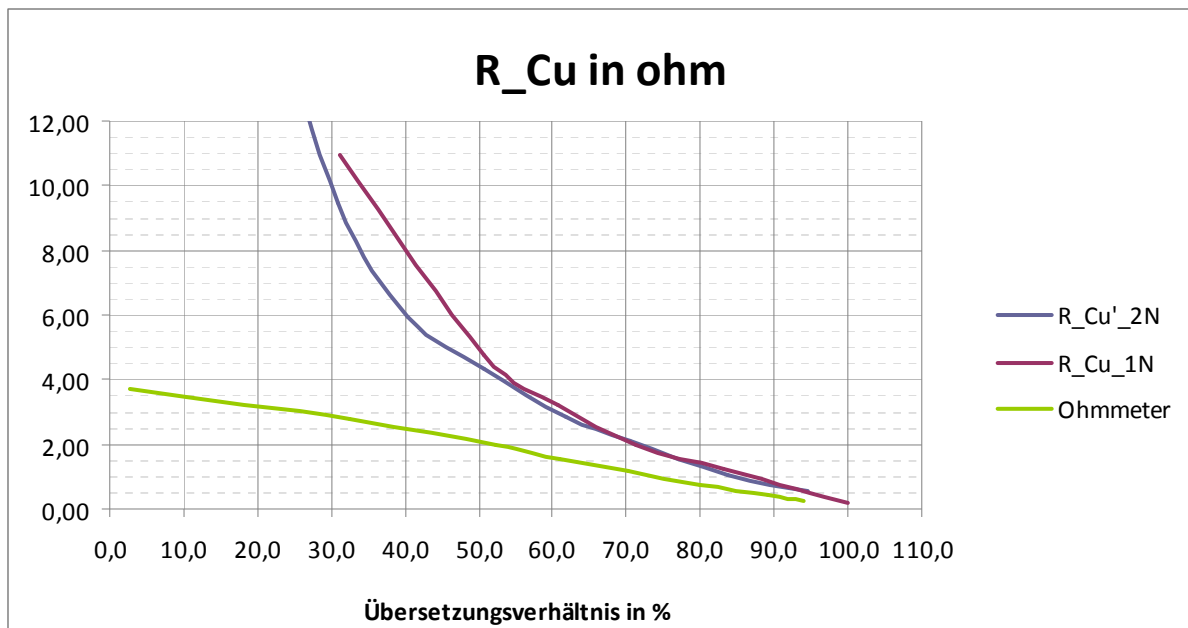
keine Verbindung zw. Buchsen 1-N , Leistungsmessung zw. Buchsen 2-N							
ü (%)	U_L1N (V)	I_L1 (mA)	P_L1N (W)	Q_L1N (Var)	U_L2N (V)	Lh_1N (H)	R_fe_1N (Ω)
100,2	221,3	0,049	6,2	9,1	220,9	17,07	7870
92,3	203	0,052	6,1	8,4	219,9	18,33	7927
82,1	180	0,0604	6,6	8,2	219,3	18,67	7287
71,6	158,5	0,0684	6,4	8,5	221,3	18,34	7652
61,8	136	0,0787	6,4	8,1	220,2	19,06	7576
50,7	112,1	0,0959	6,5	8,1	220,9	19,18	7507
32,9	72,6	0,1499	6,7	7,9	220,9	19,67	7283

Die Querelemente berechnen sich wie folgt:

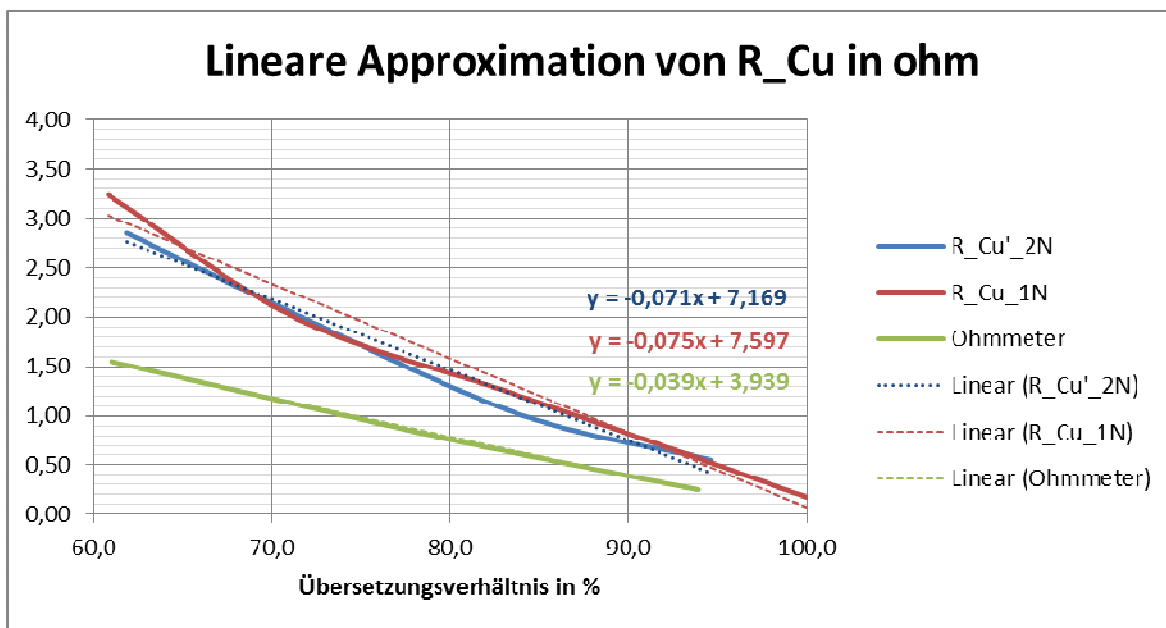
$$L_h = \frac{U_{1N}^2}{Q_{1N}} \cdot \omega$$

$$R_{Fe} = \frac{U_{1N}^2}{P_{1N}}$$

Unten dargestellt ist der Wicklungswiderstand. Es ist zu erkennen, dass sich dieser ab 50% sich nicht mehr linear verhält. Erwartungsgemäß müsste dies aber der Fall sein. Es wird hier noch einmal angeraten diese Werte als Falsch zu interpretieren. Es wurden keine weiteren Untersuchungen angestellt, da der Arbeitsbereich für ein Übersetzungsverhältnis von kleiner als 60% nicht vorgesehen ist. Auch können sich Bei den ohmschen Widerständen starke Schwankungen aufgrund des Kontaktwiderstandes ergeben. In Extremfällen können 100 Ohm gemessen werden. Die Messung wird als ausreichend genau angenommen.

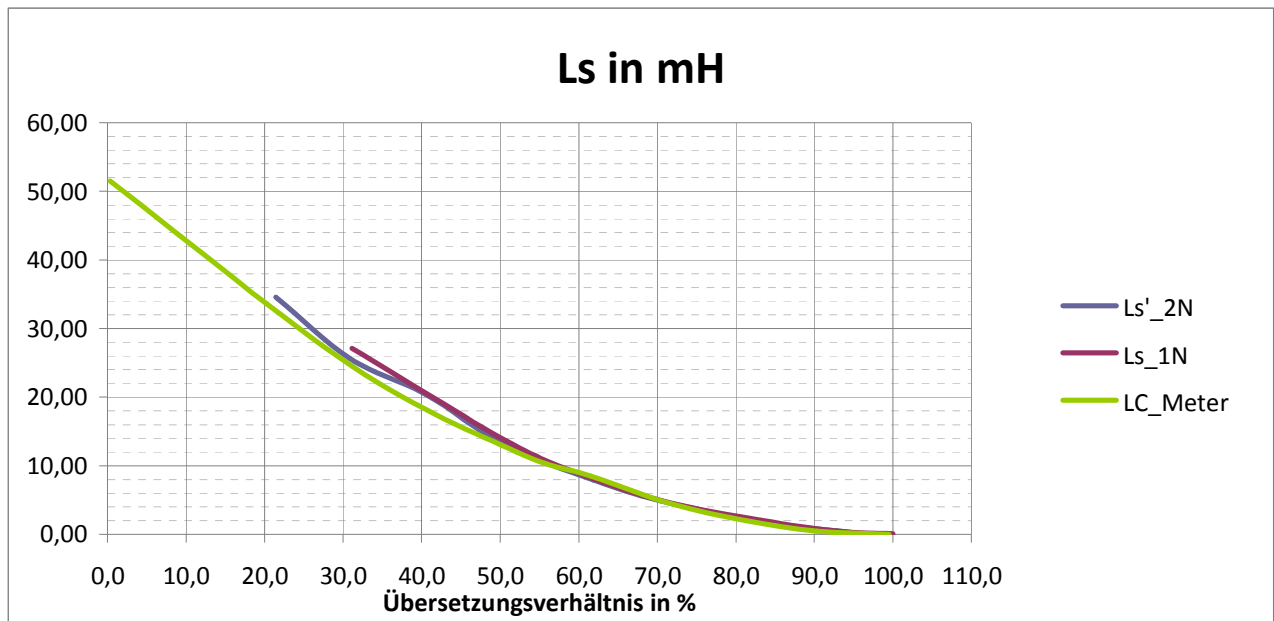


Im Bereich von 60% bis 100% weisen die Messwerte einen linearen Verlauf auf. Durch eine lineare Approximation der Messwerte wurde eine Geradengleichung in Abhängigkeit des Übersetzungsverhältnisses aufgestellt.

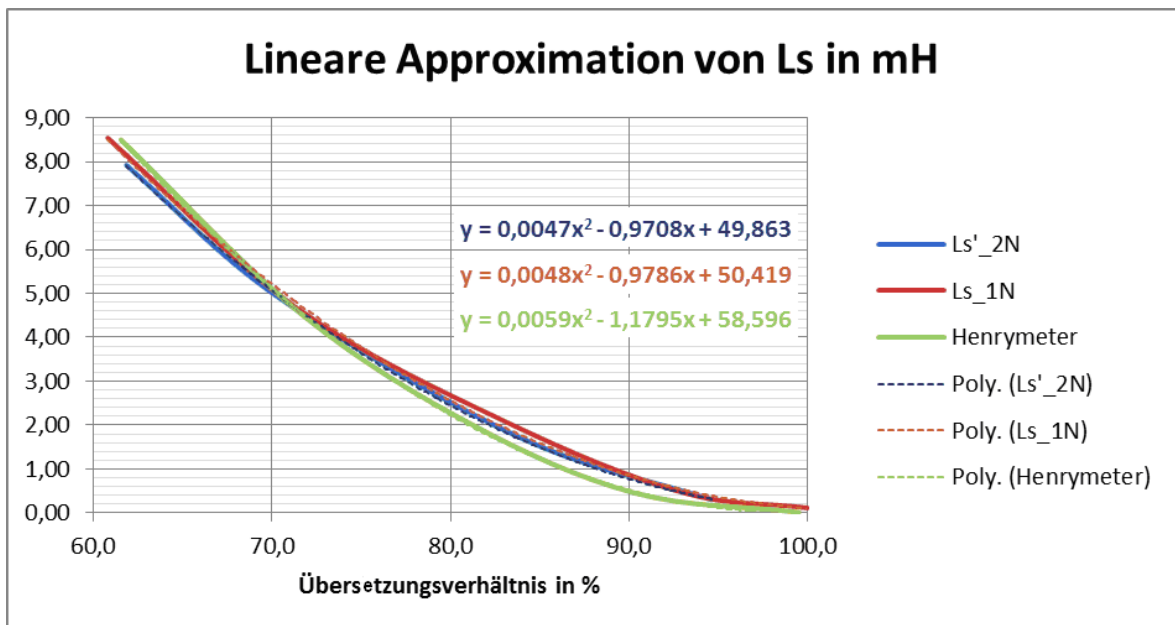


Die Streuinduktivität vom Henrymeter muss noch auf 50 Hz normiert werden, denn hier wurde mit einer Frequenz von 1 kHz gemessen. Die erhaltenen Messwerte sind 20 mal größer als die aus dem Kurzschlussversuch. Normiert haben die drei Messwerte einen

identischen Verlauf. Wegen der zwei unterschiedlichen angewandten Messverfahren werden diese Werte als richtig angenommen. Die Darstellung ist im unteren Bild.



Für den Arbeitsbereich von 60% bis 100% weisen die gemessenen Werte den Verlauf einer Quadratischen Funktion auf. Es wurde eine solche Funktion in Abhängigkeit des Übersetzungsverhältnisses approximiert.



Zusammenfassung:

Für die Ersatzelemente des Transformatorersatzschaltbildes des Simulationsprogramms *Portunus* ergeben sich Folgende Gleichungen:

$$R_{Cu}(\ddot{u}) = -0,0745 \cdot \ddot{u} + 7,5$$

$$R_{Cu1} = \frac{R_{Cu}}{2}$$

$$R_{Cu2} = \frac{R_{Cu} \cdot \ddot{u}^2}{2}$$

$$L_s(\ddot{u}) = \frac{0,00513 \cdot \ddot{u}^2 - 1,043 \cdot \ddot{u} + 52,96}{1000}$$

$$L_{s1} = \frac{L_s}{2}$$

$$L_{s2} = \frac{L_s \cdot \ddot{u}^2}{2}$$

$$L_h = 16,1H$$

$$R_{Fe} = 7300\Omega$$

[A3] Messprotokoll zweite Ausmessung des Transformators

Der Transformator wurde auf der Netzzugewandten Seite kurzgeschlossen und von der Wechselrichterseite mit einem Spannungssprung von 2,49 V belegt. Die eingestellte Übersetzung betrug 70%. Der sich maximal einstellende Strom betrug 1,25 A. Die vergangene Zeit von 0 A bis 1,25 A * 0,632 = 0,79 A betrug 2,4 ms. Aus den Erhaltenen Werten wurden der Widerstand und die Induktivität bestimmt.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{2,49V}{1,25A} = \underline{\underline{1,992\Omega}}$$

$$L = R \cdot \tau = 1,992\Omega \cdot 0,0024s = \underline{\underline{4,78mH}}$$

Zur Überprüfung der Angaben sind zwei Oszillogramme eingefügt. Kanal 1 (die obere Kurve) zeigt die anliegende Spannung über dem Transformator mit einem 10:1 Tastteiler. Kanal 2 (die untere Kurve) zeigt den Stromverlauf durch den Transformator. Er ist im Tastverhältnis 1:1 dargestellt und wurde mit einer Strommesszange erfasst. Die Strommesszange liefert bei 1 A 100 mV zurück. 79mV entsprechen demzufolge 790mA.

Eine Separate Messung von Gleichstrom und Gleichspannung über einen längeren Zeitraum, also dem statischen Zustand ergab.

$$U = 1,885 V$$

$$I = 1,042 A$$

$$R = 1,8090211132437619961612284069098 \Omega$$

$$L = 0,00434165067178 H$$

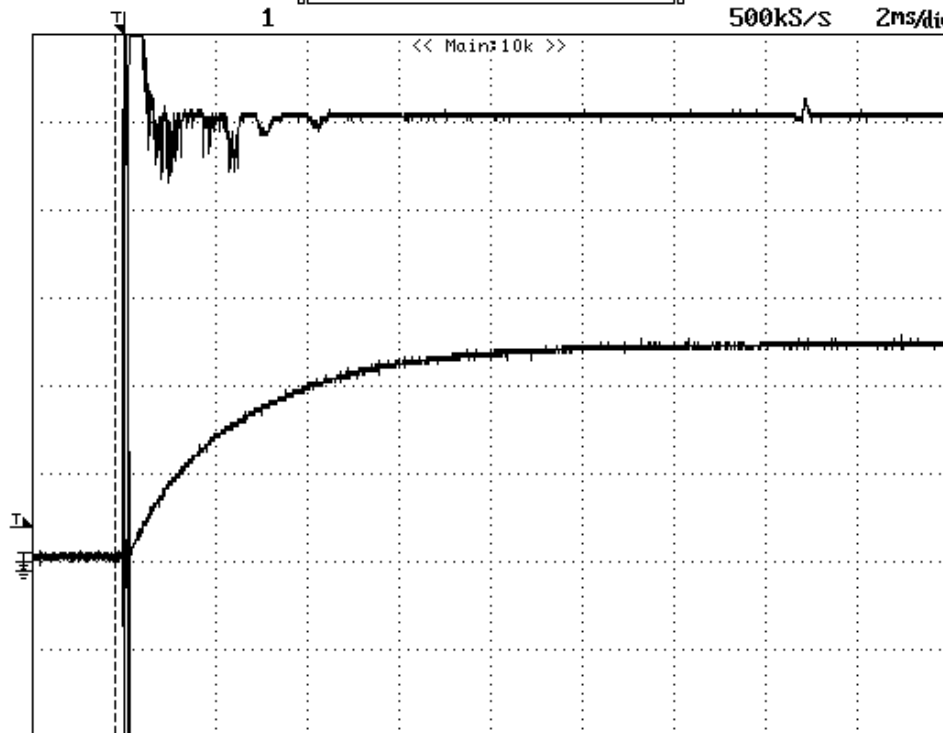
Dieser Widerstand wird auch angenommen.

2013/01/25 22:42:02

1 

Normal


500kS/s 2ms/div



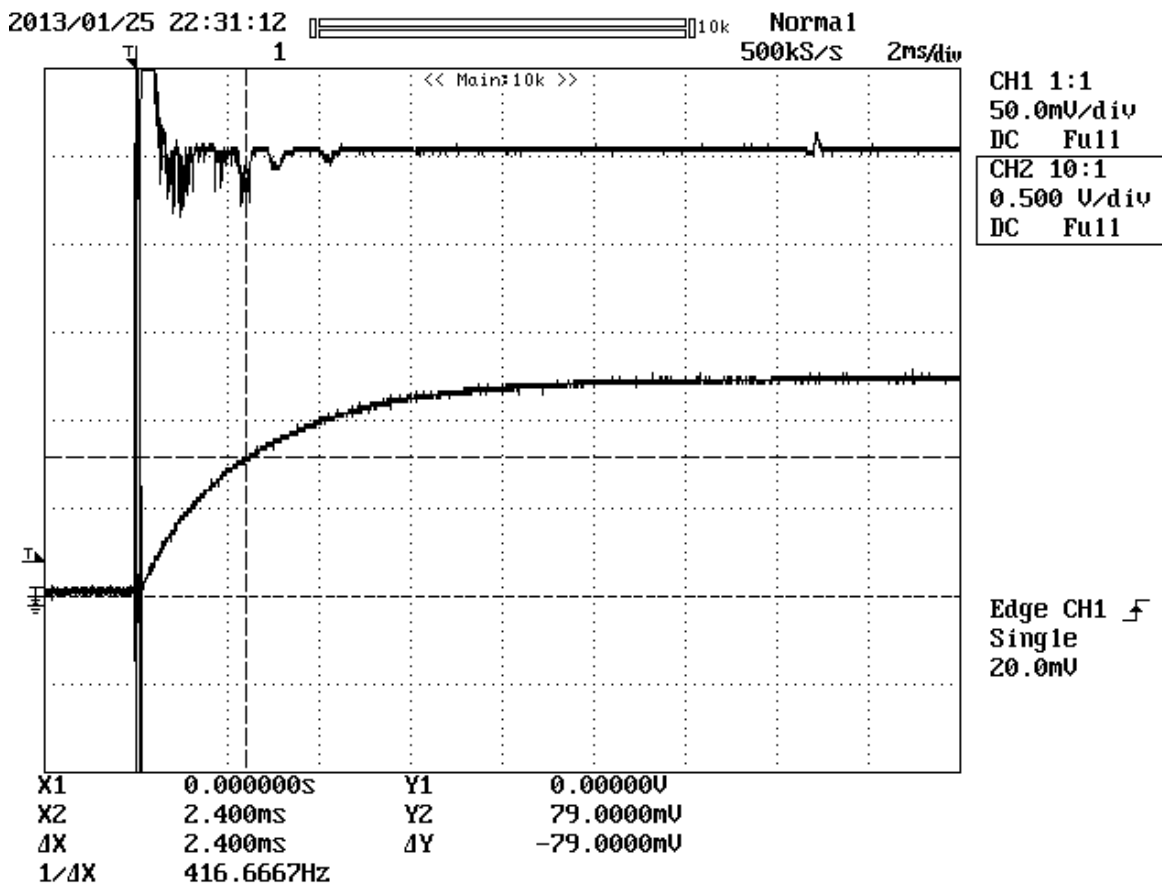
<< Main:10k >>

CH1 1:1
50.0mV/div
DC Full

CH2 10:1
0.500 V/div
DC Full

Edge CH1 
Single
20.0mV

Max(C1) 129.167mV
Rise(C1) 3.420ms
Rms(C2) 2.49190V

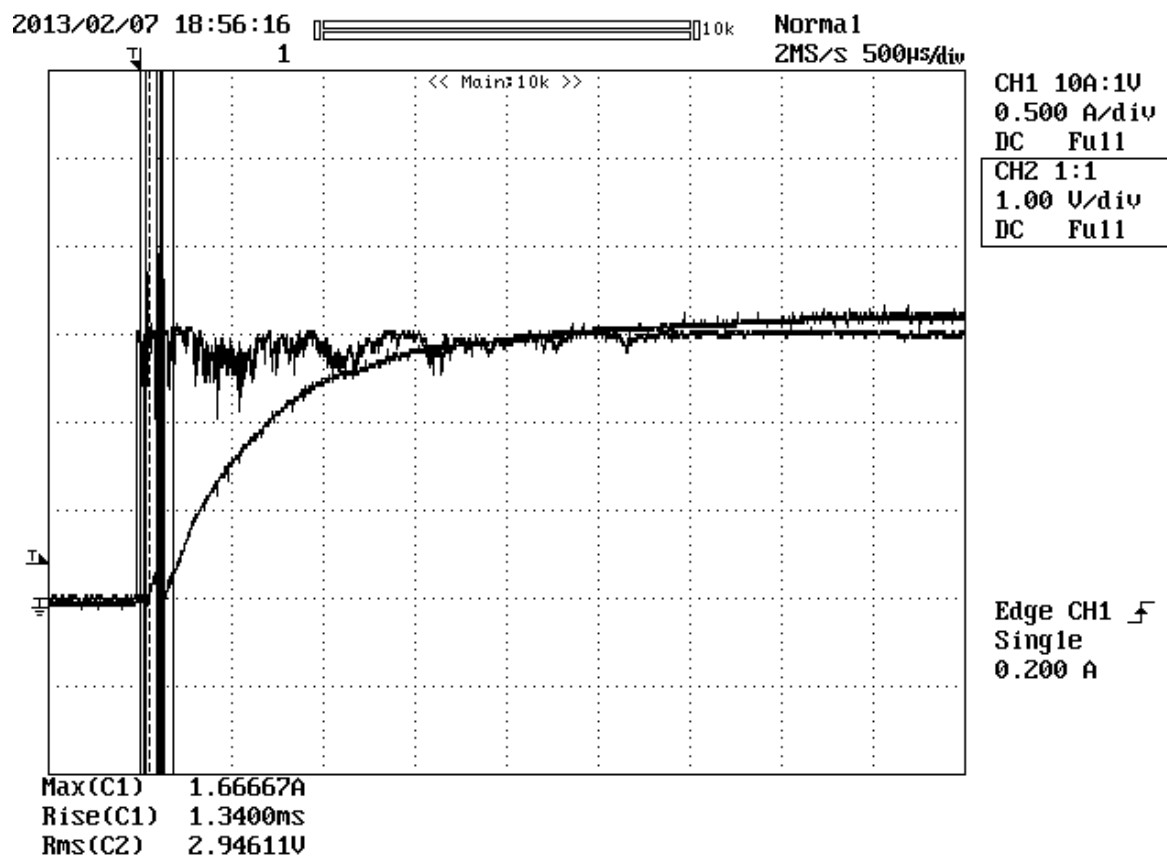
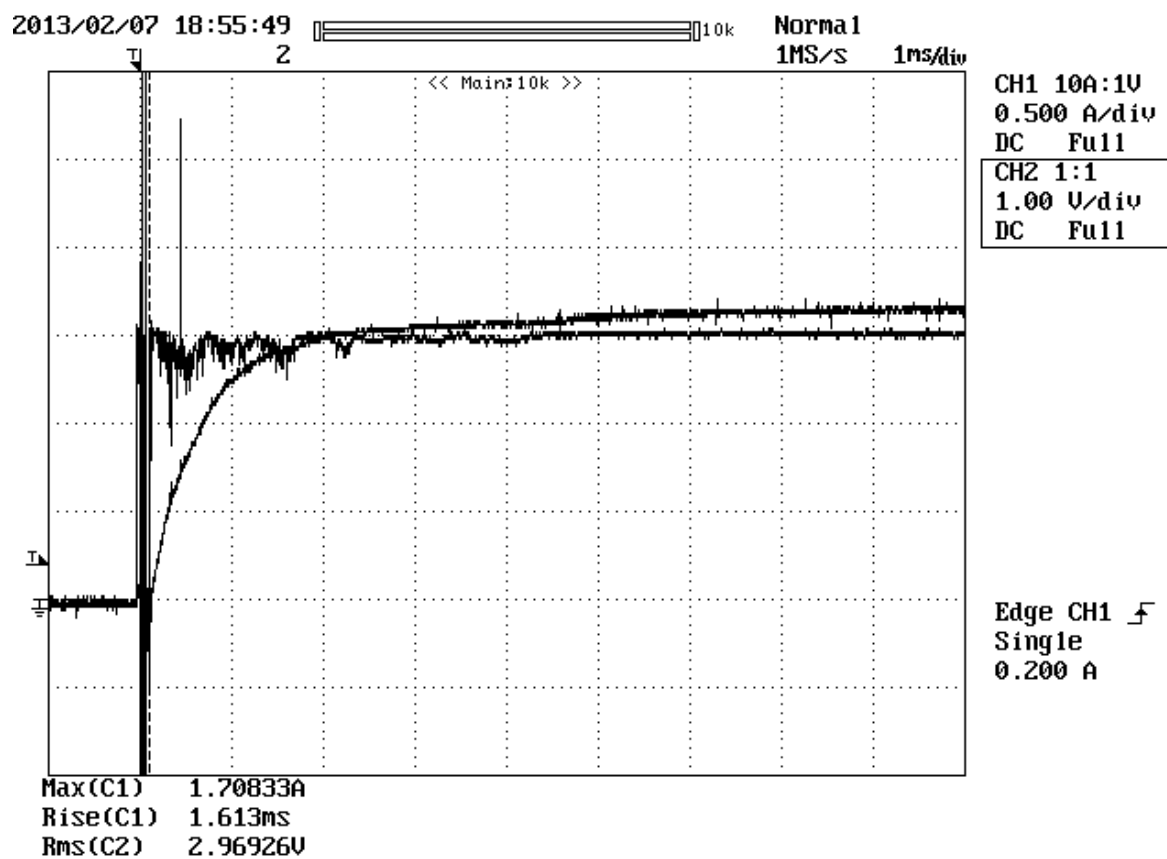


[A4] Messprotokoll Ausmessung des Trenntransformators

Der Transformator wurde auf der einer Seite kurzgeschlossen und von der anderen Seite mit einem Spannungssprung von 2,969 V belegt. Der sich maximal einstellende Strom betrug 1,036 A. Die vergangene Zeit bis zu 62,3 % der Anstiegszeit betrug 731 μ s. Aus den Erhaltenen Werten wurden der Widerstand und die Induktivität bestimmt.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{0,68475V}{1,036A} = \underline{\underline{0,081805019305019305019305019305019\Omega}}$$

$$L = R \cdot \tau = 0,0818\Omega \cdot 0,000731s = \underline{\underline{0,579mH}}$$

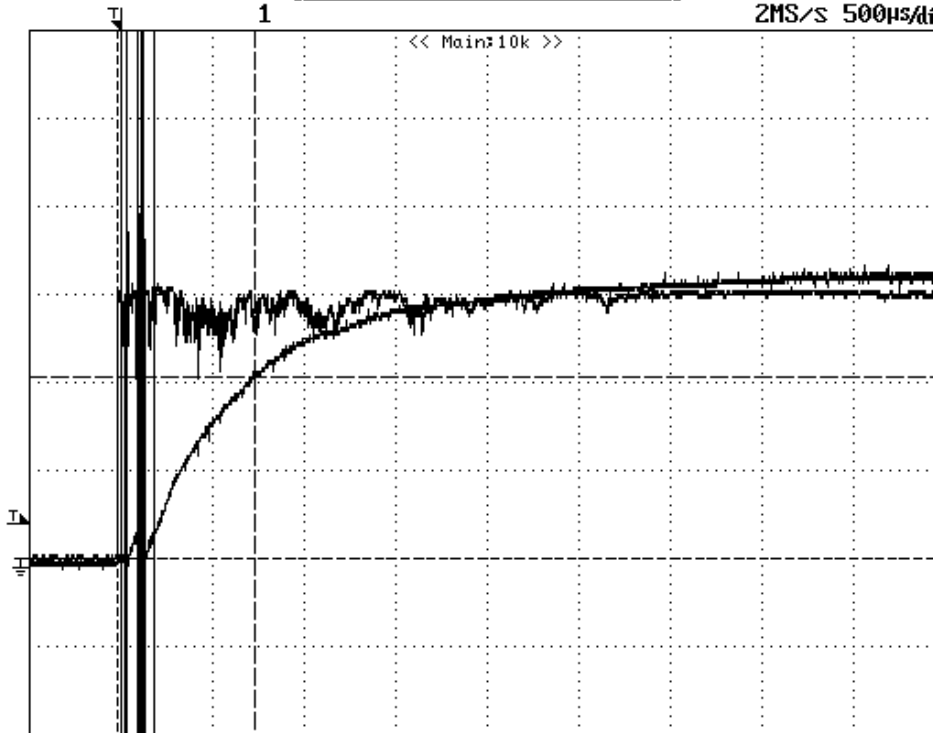


2013/02/07 19:00:47

10k

Normal

2MS/s 500µs/div



CH1 10A:1V
0.500 A/div
DC Full

CH2 1:1
1.00 V/div
DC Full

Edge CH1 ∇
Single
0.200 A

CURSOR	
Curs1	-4.040div
Curs2	-2.537div

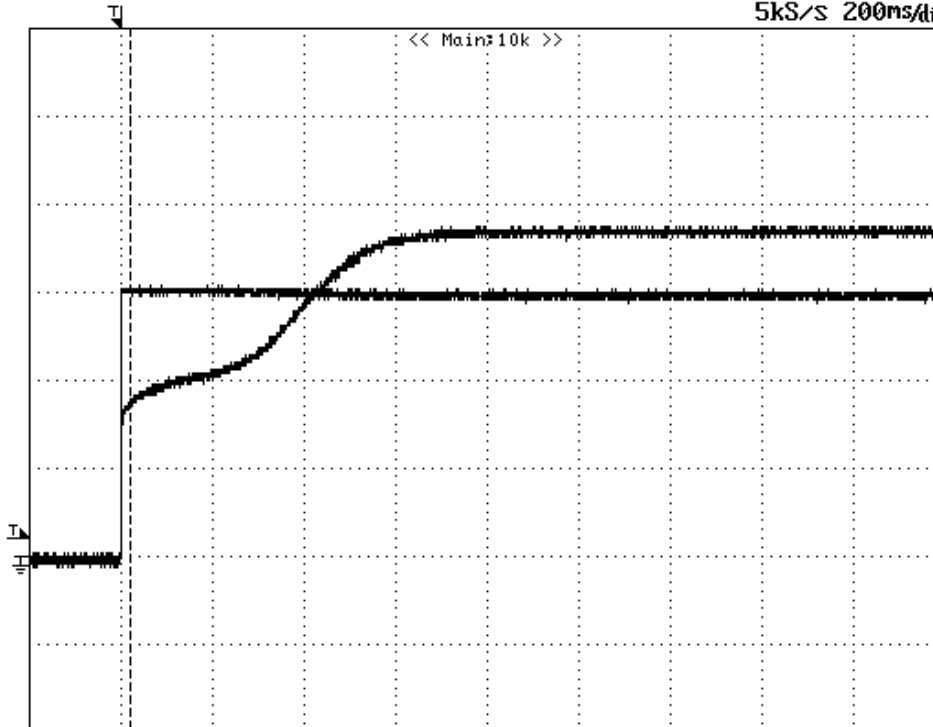
X1	-20.0µs	Y1	0.00000A
X2	731.5µs	Y2	1.03500A
ΔX	751.5µs	ΔY	-1.03500A
1/ ΔX	1.330672kHz		

2013/02/07 19:09:32

10k

Normal

5kS/s 200ms/div



CH1 1:1
0.100 V/div
DC Full

CH2 1:1
1.00 V/div
DC Full

Edge CH1 ∇
Single
0.020 V

Max(C1)	375.000mV
Rise(C1)	336.8ms
Rms(C2)	2.97663V

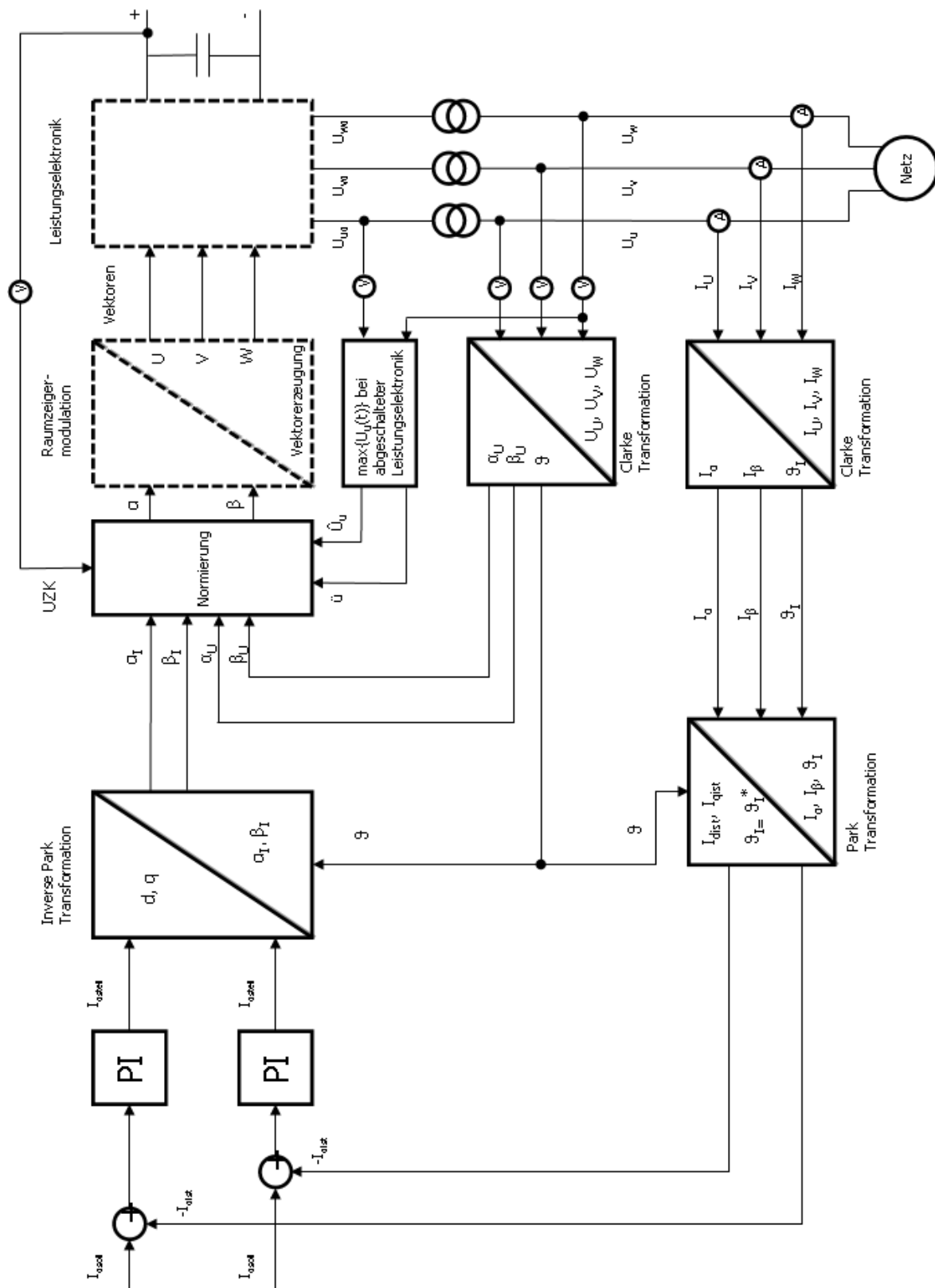
[A5] Park-Transformation und inverse Park-Transformation für symmetrische Systeme

$$I_{dq} = \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix}$$

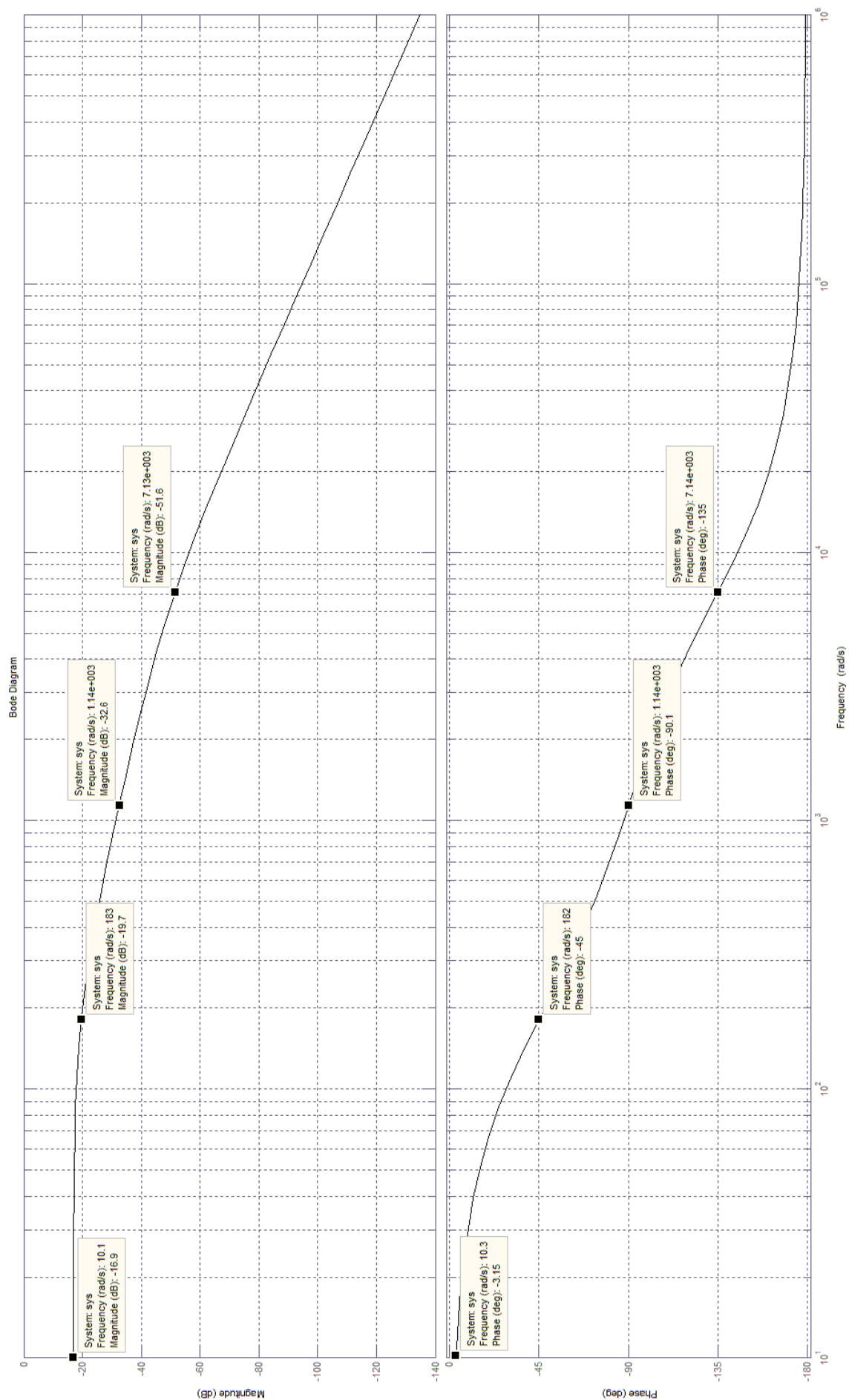
Inverse

$$I_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix}$$

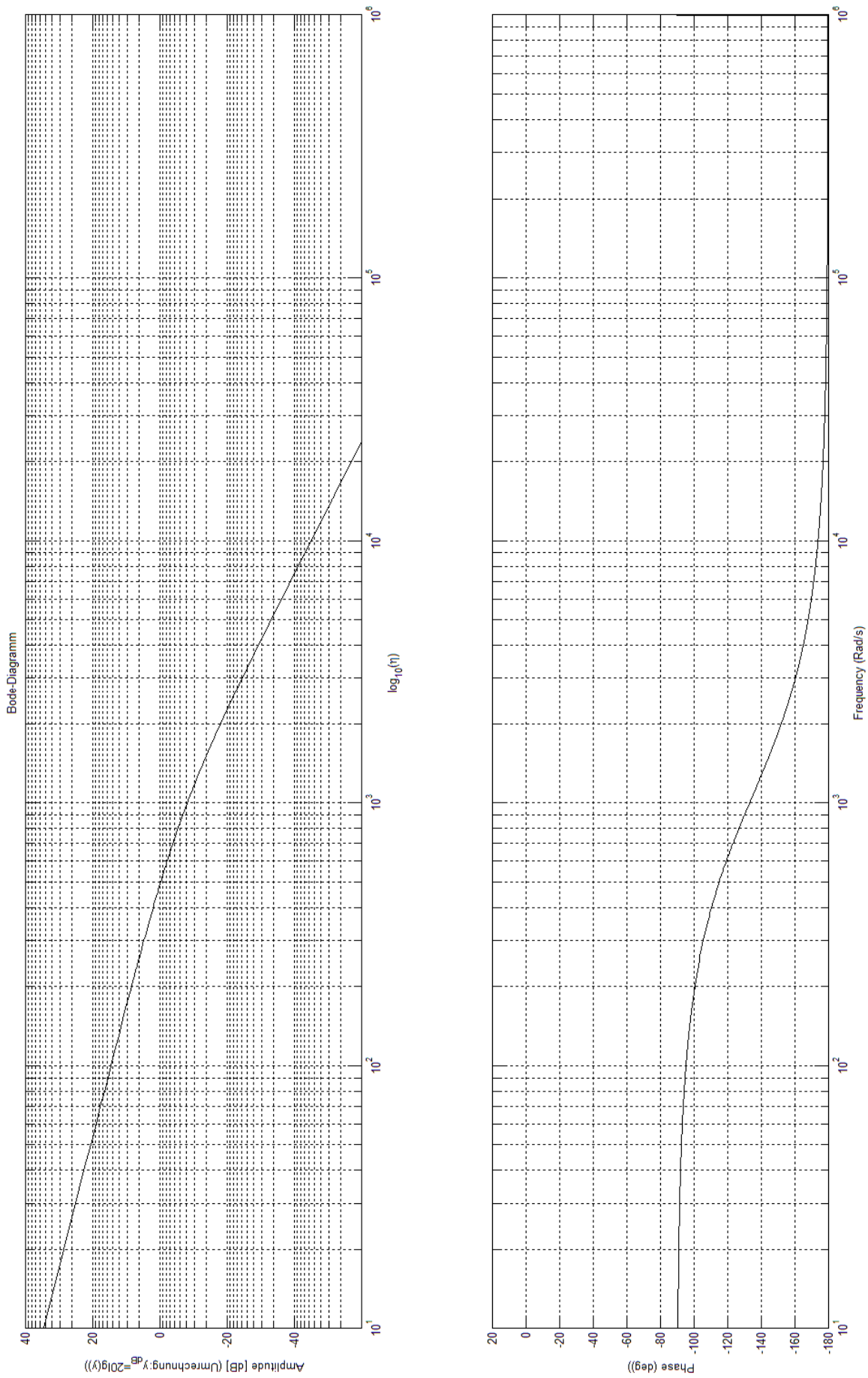
[A6] Übersichtstafel Funktionsweise des Wechselrichters



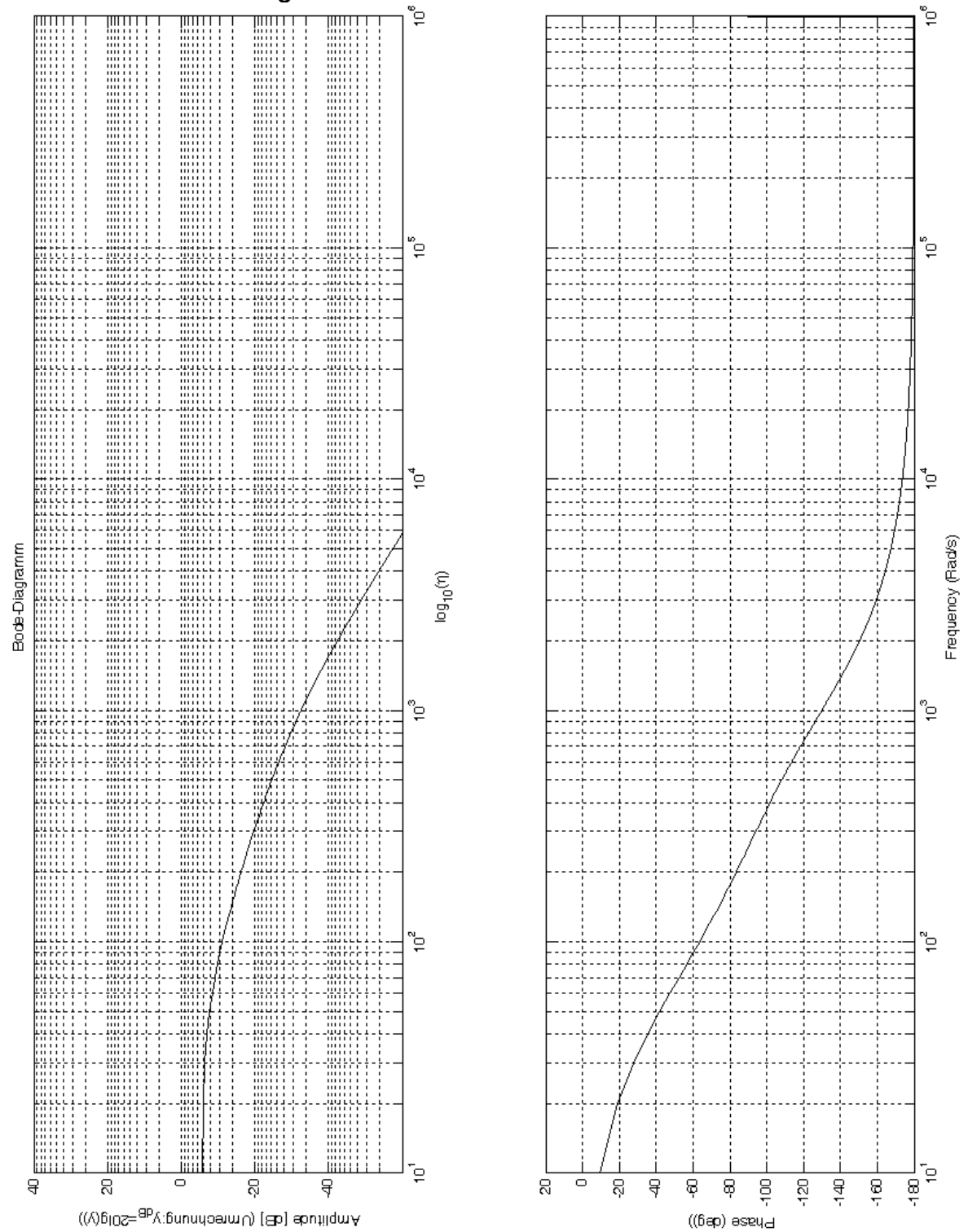
[A7] Bode-Diagramm offene Regelstrecke aus Wechselrichter und Transformator



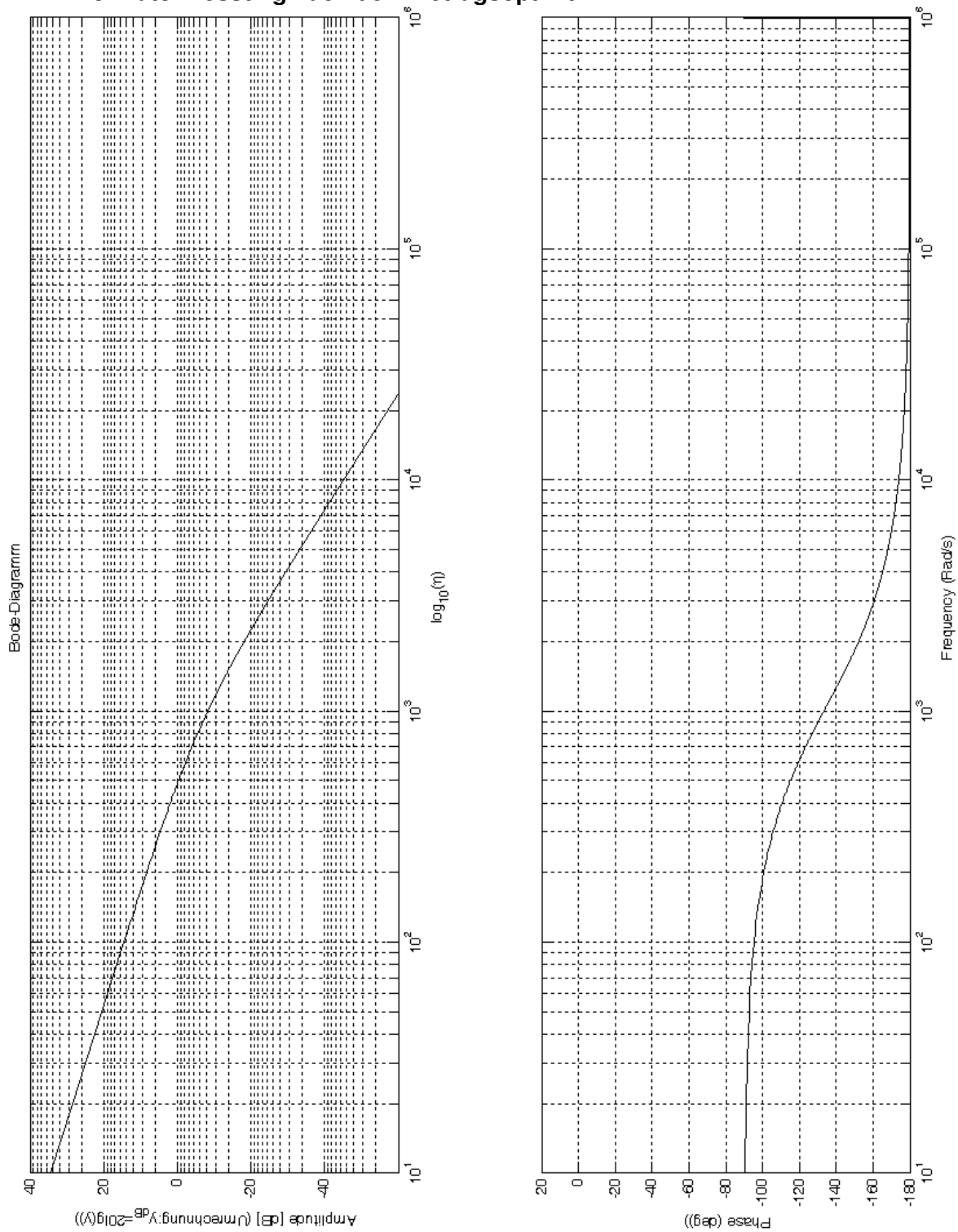
[A8] Bode-Diagramm der Strecke nach dem Betragsoptimum



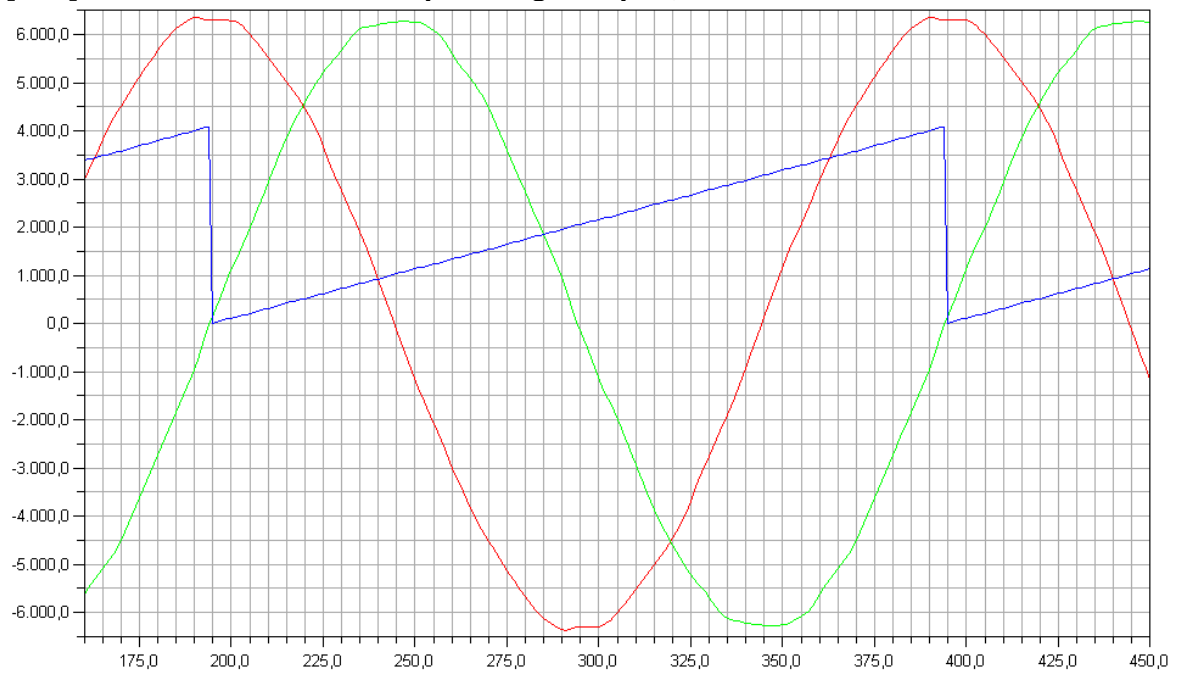
[A9] Bode-Diagramm Regelstrecke mit Trenntransformator und zweite Stelltransformatormessung



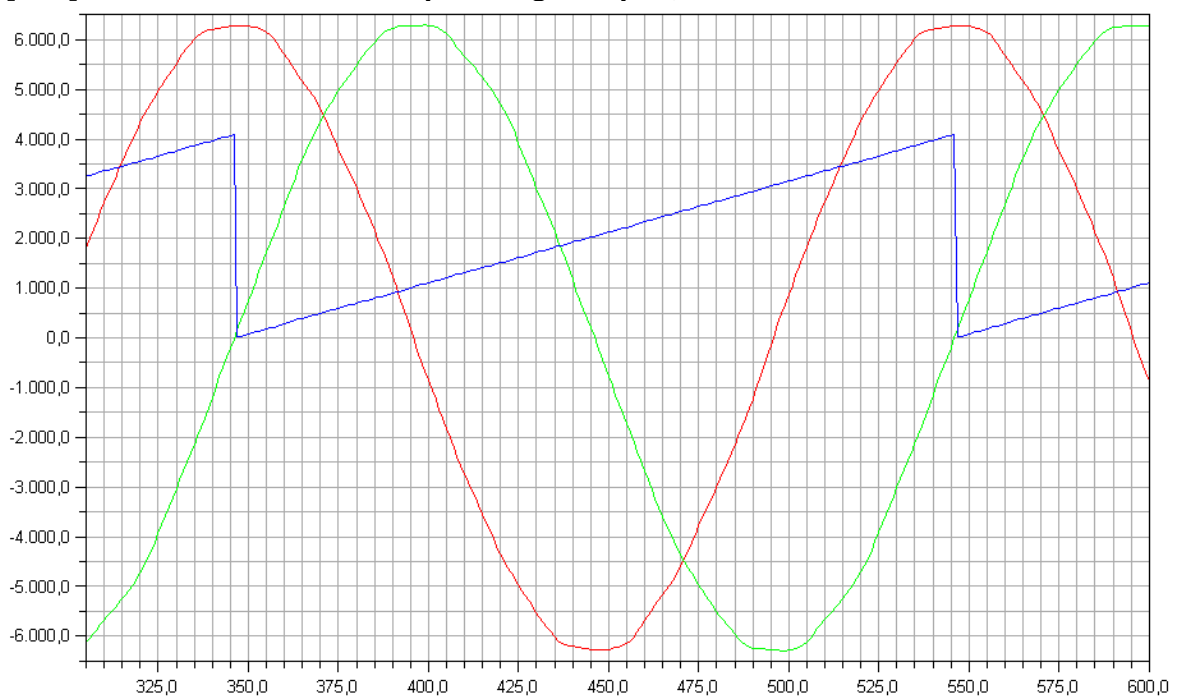
[A10] Bode-Diagramm Regelstrecke mit Trenntransformator und zweite Stelltransformatormessung nach dem Betragsoptimum



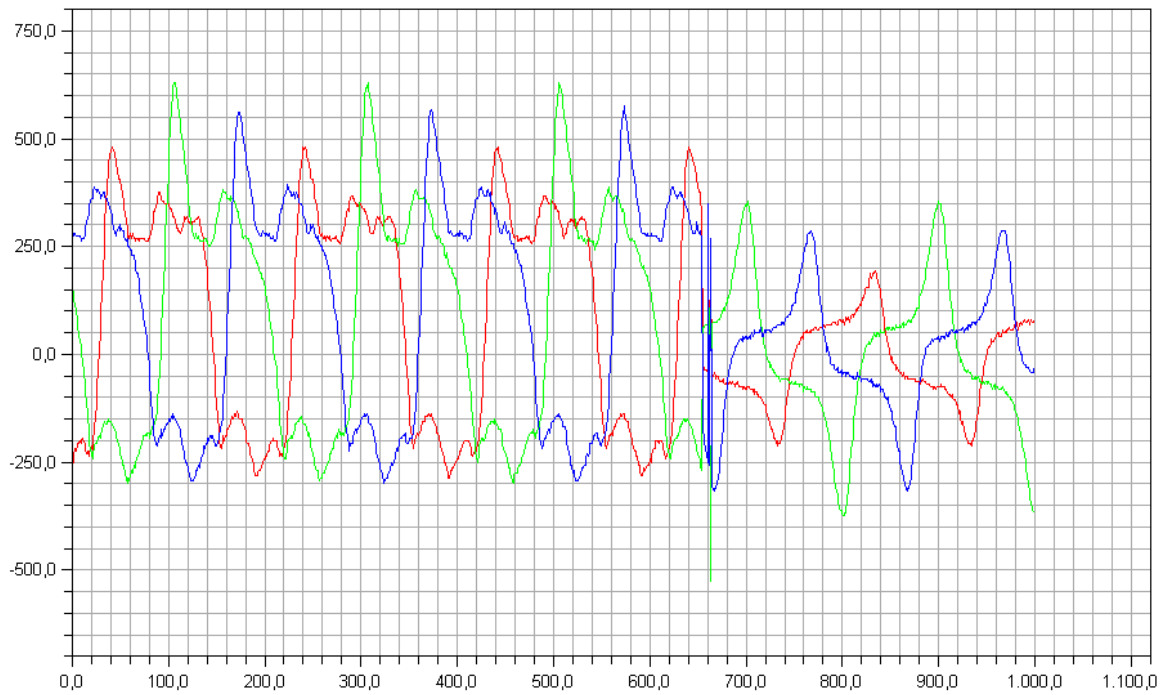
[A11] Clarke transformierte Spannungen Alpha, Beta und Theta um ca. 14 Uhr



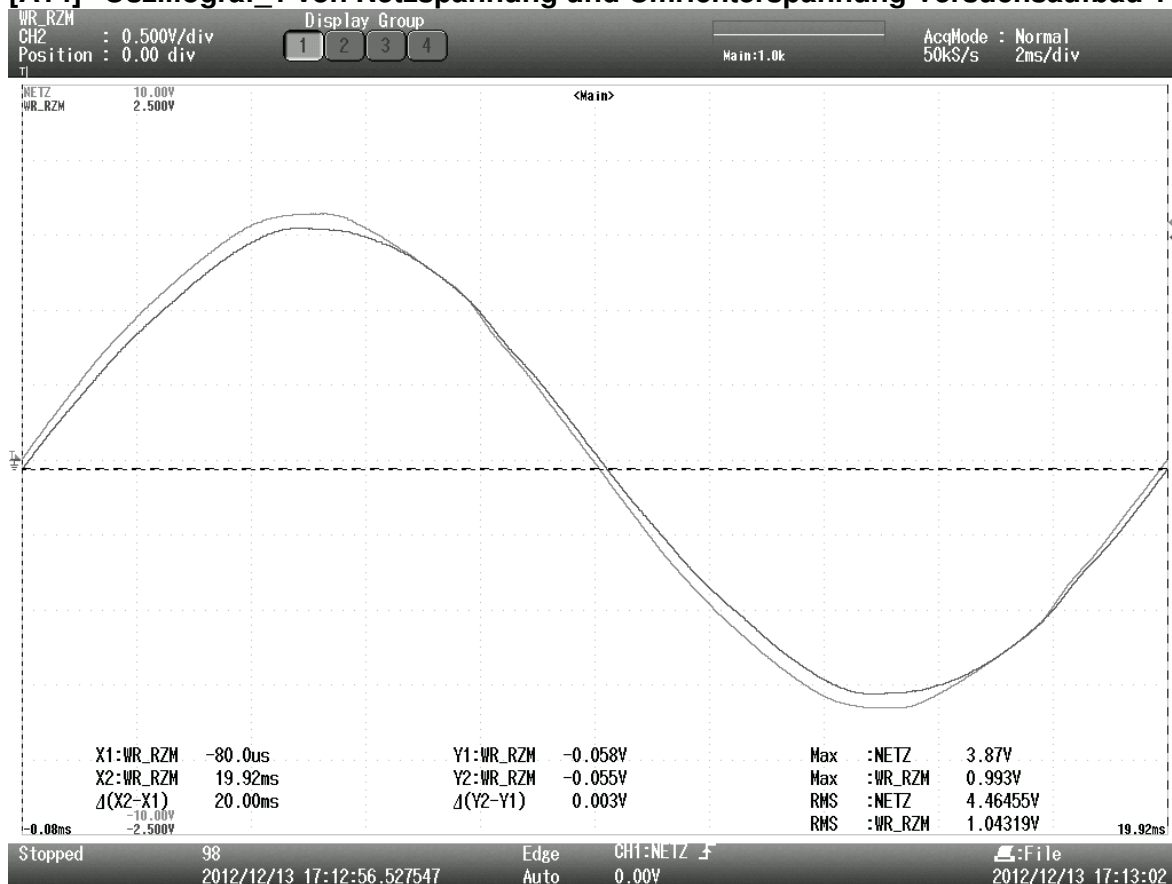
[A12] Clarke transformierte Spannungen Alpha, Beta und Theta um ca. 20 Uhr



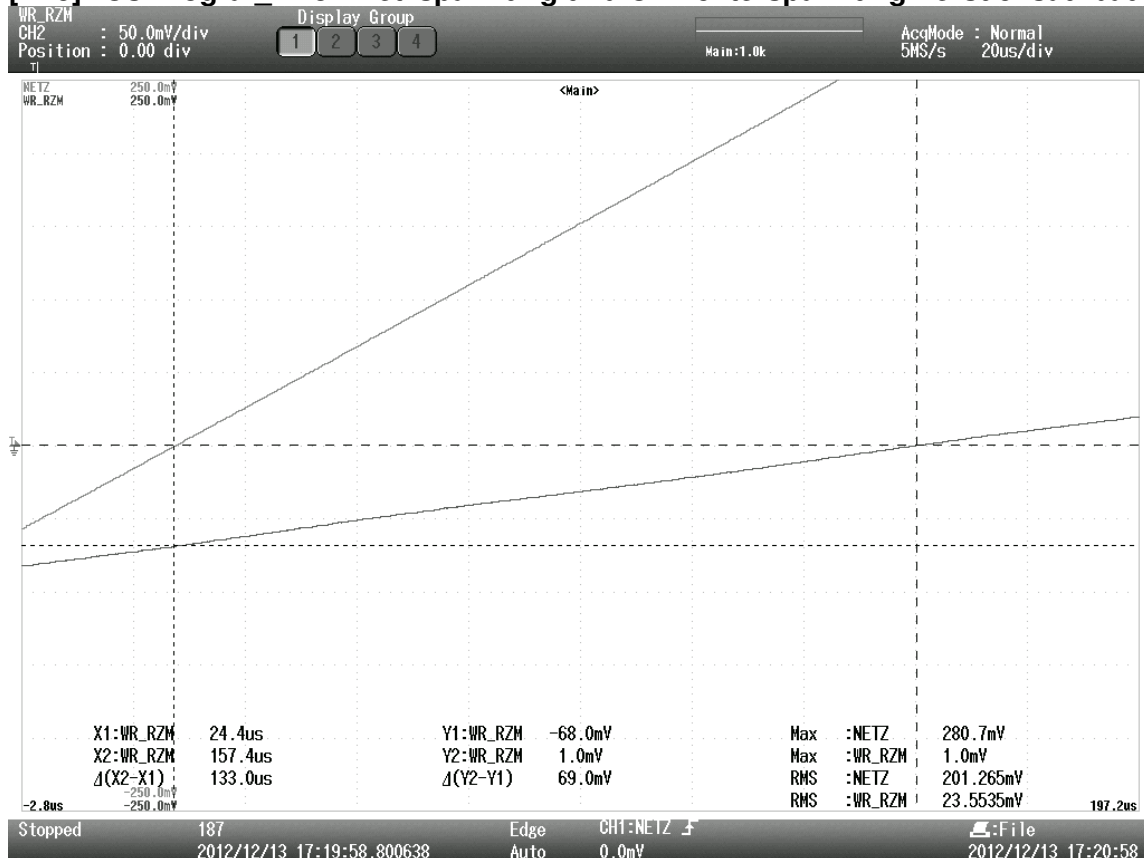
[A13] Ströme UVW über Widerstände von 330 Ohm bei RZM ohne fehlerhaften Anschluss



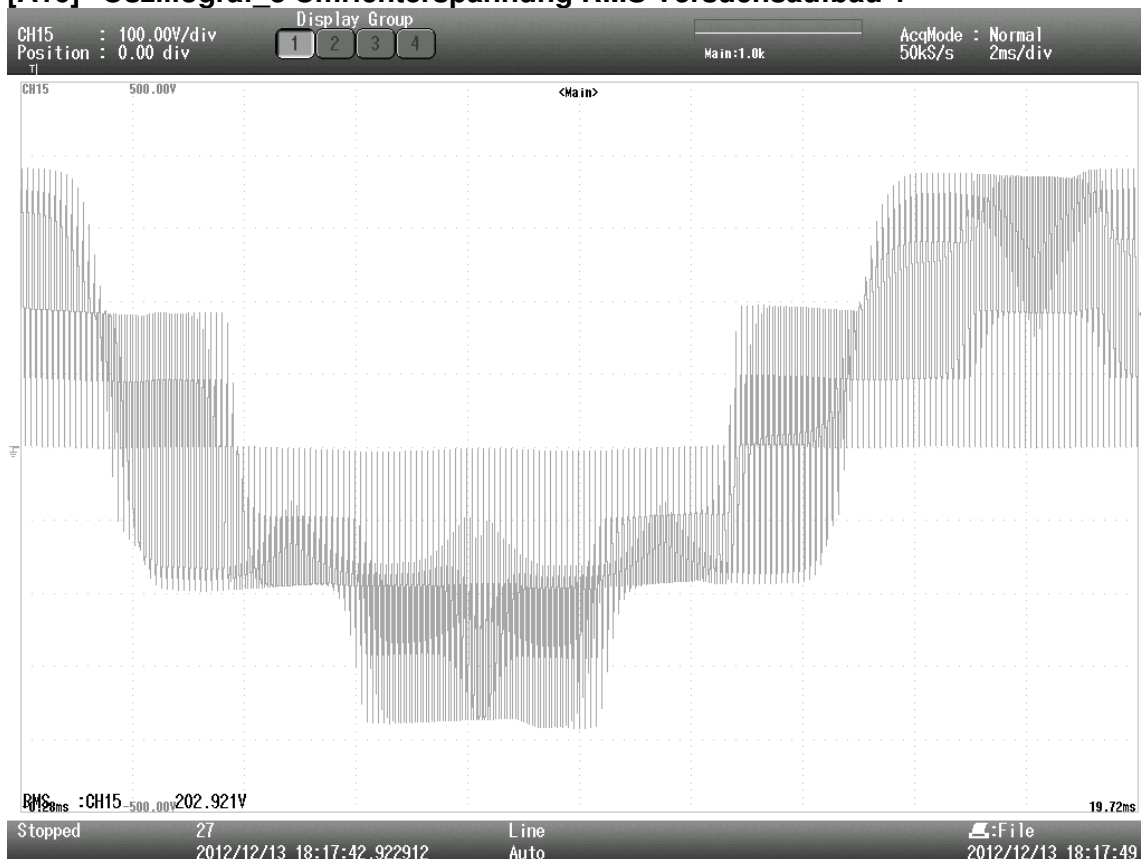
[A14] Oszillograf_1 von Netzspannung und Umrichterspannung Versuchsaufbau 1



[A15] Oszillograf_2 von Netzspannung und Umrichterspannung Versuchsaufbau 1



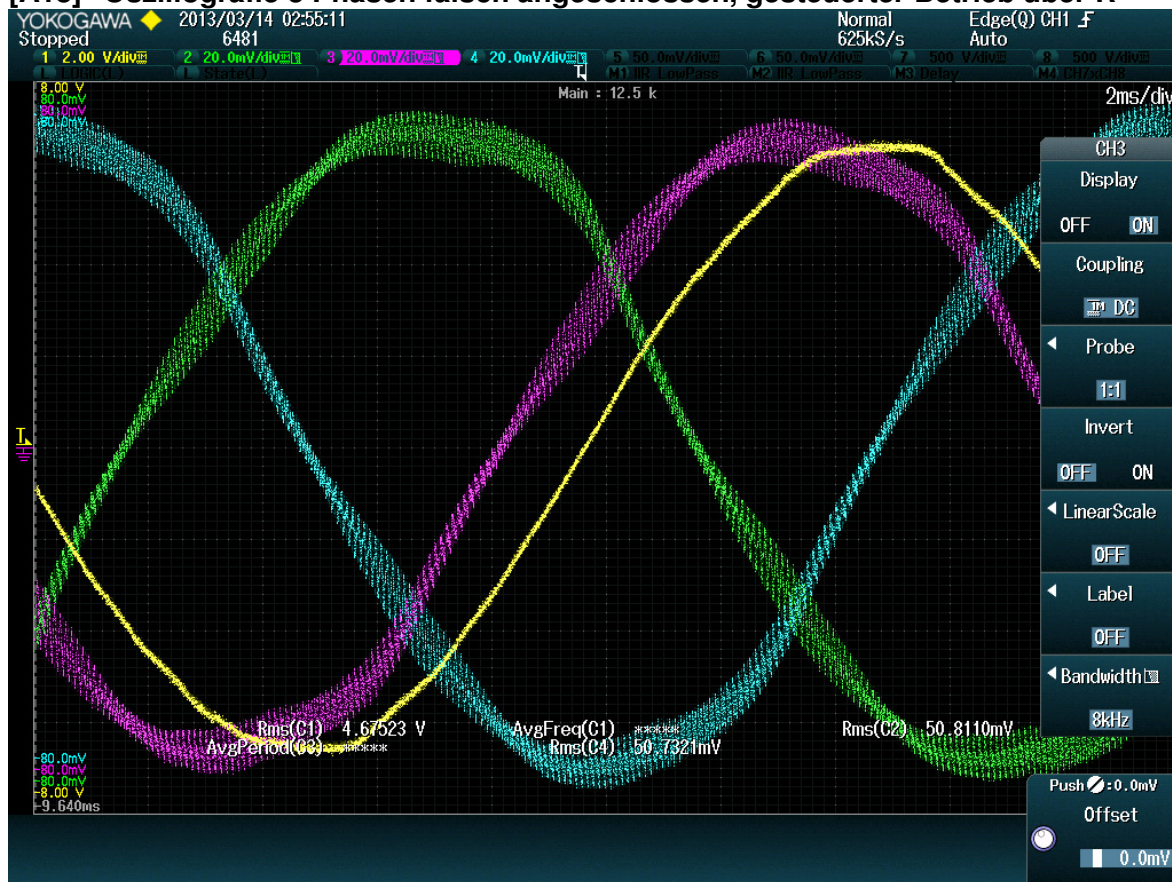
[A16] Oszillograf 3 Umrichterspannung RMS Versuchsaufbau 1



[A17] Oszillografie 2 Phasen falsch angeschlossen, gesteuerter Betrieb über R



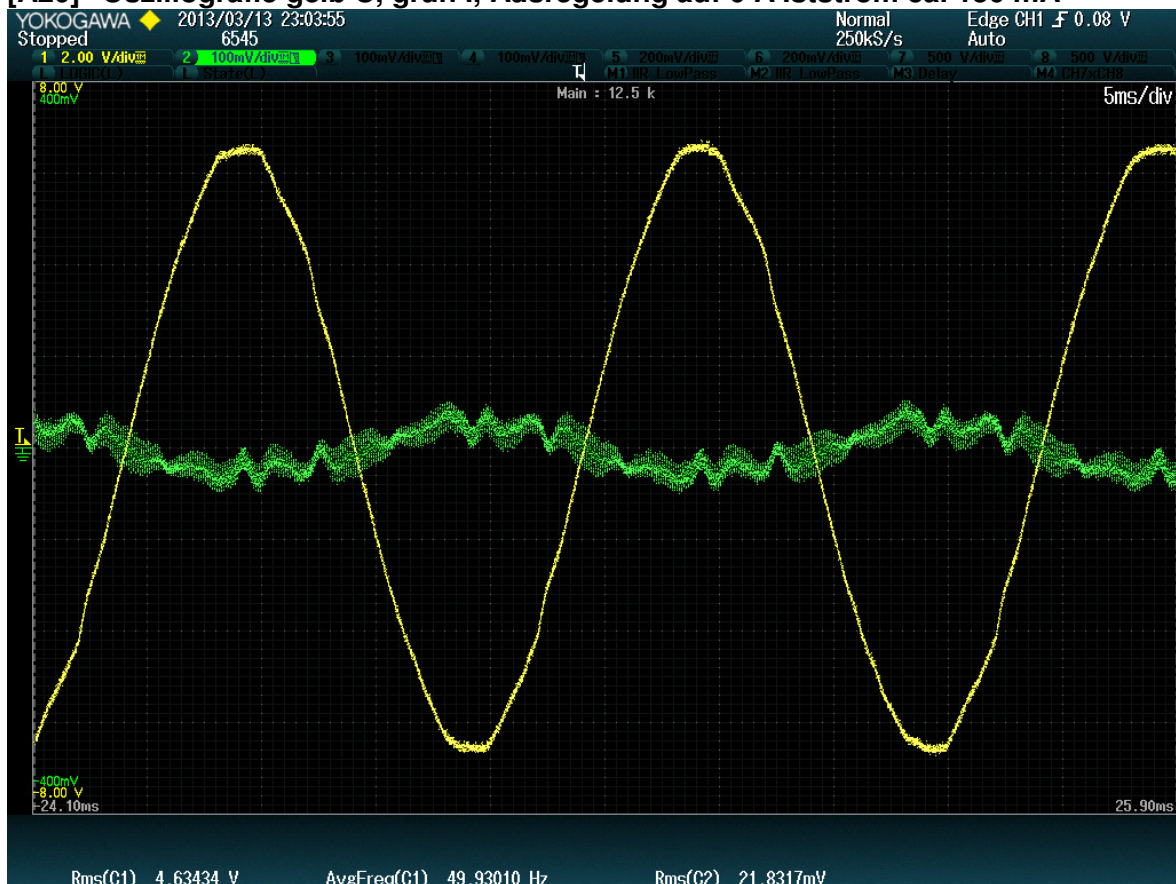
[A18] Oszillografie 3 Phasen falsch angeschlossen, gesteuerter Betrieb über R



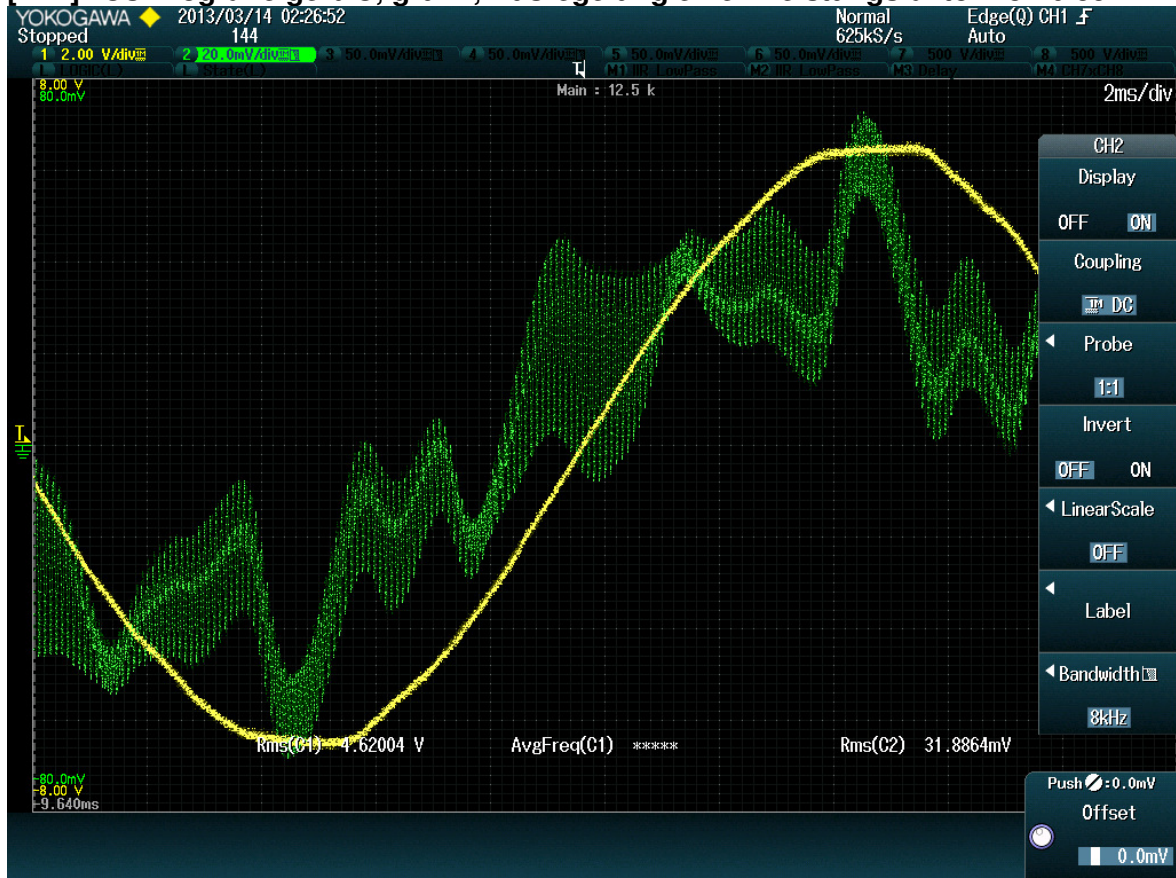
[A19] Oszillografie gelb U, grün I, rot Sollwert d-Anteil, orange Istwert d-Anteil



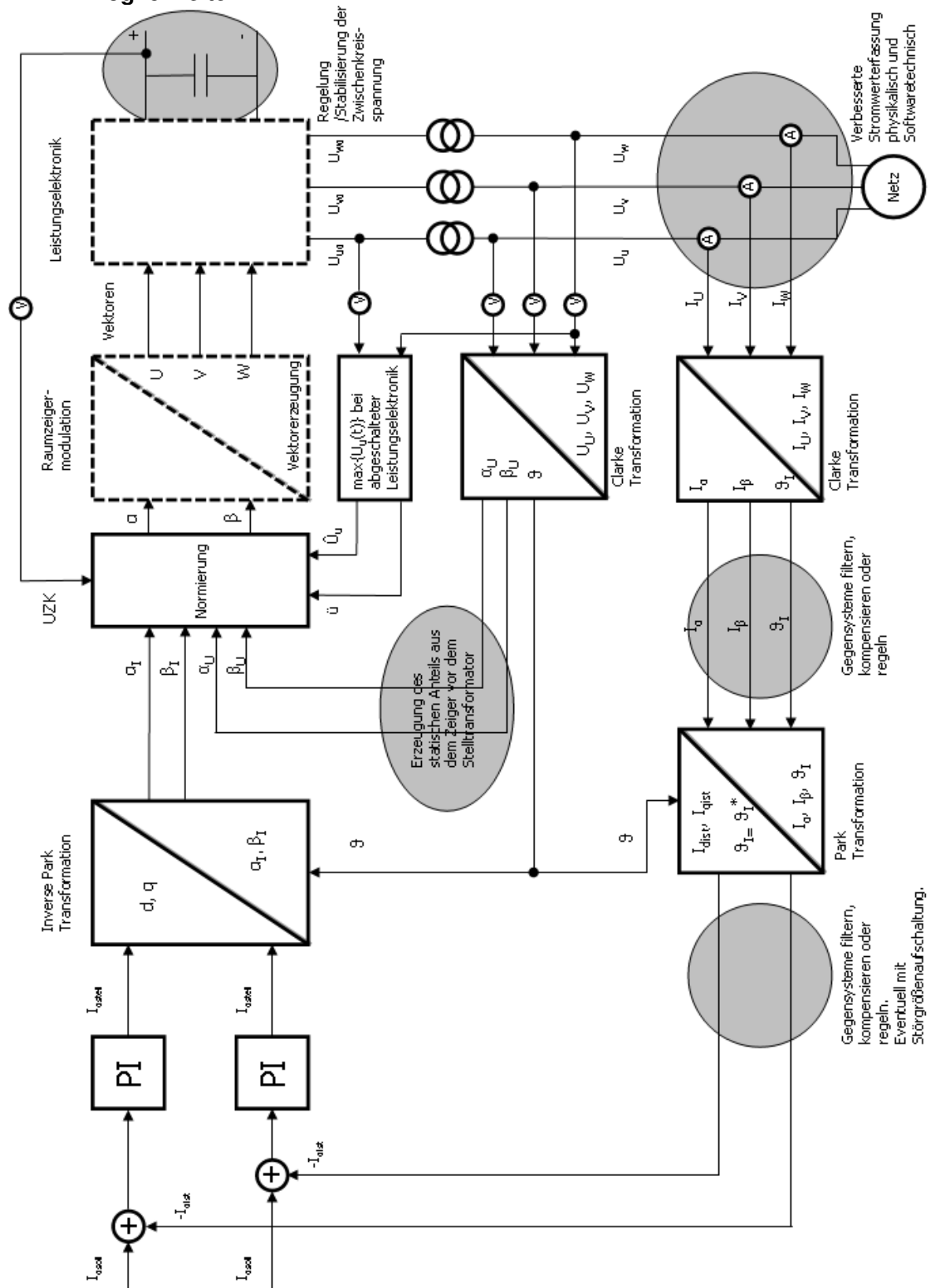
[A20] Oszillografie gelb U, grün I, Ausregelung auf 0 A Iststrom ca. 150 mA



[A21] Oszillografie gelb U, grün I, Ausregelung einen Leistungsfaktor von 0.85



[A22] Übersichtstafel Funktionsweise des Wechselrichters mit Verbesserungsmöglichkeiten



Anlagen, Teil 2 Quellcode

Matlab-Programm BodeDiagramm.m

```
clc; clear; close all;
s=0:10:10000000;
wert=1:1:1000000;
kr=24.9692961641;
V1=(1./(0.00015*1i*2*pi*s+1)).*(0.359./(0.0026891931968781*1i*2*pi*s+1)).
*(kr*(1+1./(0.0026891931968781*1i*2*pi*s)));
realteilv=((sign(imag(V1))>=0 & sign(real(V1))<0) | (sign(imag(V1))<0 &
sign(real(V1))<=0));
imagteilv=(sign(imag(V1))<0 & sign(real(V1))>0)*2;
bedingung=realteilv+imagteilv;
VV1=atan(imag(V1)./real(V1));
for ind=1:100000;
switch bedingung(ind)
    case {1}
        VV1(ind)=VV1(ind)-1*pi;
    case {2}
        VV1(ind)=VV1(ind)+0*pi;
    end
end
figure(1);
subplot(211);
loglog(s,abs(V1),'k-');
axis([10 10000000 0.001 100]);
title('Bode-Diagramm');
ylabel('Amplitude [dB] (Umrechnung: y_{dB}=20lg(y))');
xlabel('log_{10}(\eta)');
ydb=20*log10(10^-2):20:20*log10(10^2);
set(gca,'ytick',10.^(ydb/20));
set(gca,'yticklabel',ydb);
set(gca,'xtick',10.^(-1:1:10));
%set(gca,'xticklabel',10.^(0:1:1));
grid on;

subplot(212)
semilogx(s,VV1*(180/pi),'k-')
grid on
ylabel('Phase (deg)')
xlabel('Frequency (Rad/s)')
```


C-Programmbibliothek für den DSP

arithmetik.h

```
#ifndef _ARITHMETIK_H_
#define _ARITHMETIK_H_
    int fixpunktconversion(int, int, int);
    int mull6(int, int, int);
    int mul32(long long, long long, int);
    int divil6(int, int, int);
    int divi32(long long, long long, int);
    int zweierkomplement32(int);
#endif
/* EOF */
```

arithmetik.c

```
int fixpunktconversion(int zahl, int altformat, int neuformat)
{
    if (altformat != neuformat){
        if (altformat > neuformat) zahl =
            (zahl >> (altformat - neuformat));
        if (neuformat > altformat) zahl =
            (zahl << (neuformat - altformat));
    }
    return zahl;
}

/*Multipliziert 2 Integer Zahlen. Rückgabewert ist Integer.
Zahlenformatierung mittels Konversion durch schieben
ACHTUNG: Keine Überlaufüberprüfung maximal zwei 16Bit Zahlen multiplizieren.*/
int mull6(int a, int b,int konversion){
    int retwert;
    retwert = ((a * b) >> konversion);
    return retwert;
}

/* Multiplikation für zwei 32Bit Zahlen*/
int mul32(long long a, long long b,int konversion){
    int retwert;
    retwert =(int)((a * b) >> konversion);
    return retwert;
}

/*Dividiert zwei 16Bit Integer*/
int divil6(int zaehler, int nenner, int konversion){
    signed int temp;
    if (nenner == 0) nenner = 1;
    /* Division durch NULL verhindern. Nenner wird auf den kleinsten, positiven Integer-Wert gesetzt. */
    /*Zähler an Nenner Anpassen Bsp: Q10.6 / Q1.15 Zähler muss mit 2^15 erweitert werden. Ergebnis ist wieder Q10.6
    Ergebnis ist demzufolge immer Zählerformat. Im Sonderfall anpassen. Halber Nenner wird addiert um auf die letzte Stelle richtig zu runden*/
    temp = zaehler << konversion;
    temp = temp+nenner/2;
    return temp/nenner;
}

/*Division für 32 Bit Integer*/
int divi32(long long zaehler, long long nenner, int konversion){
    long long temp;
    if (nenner == 0) nenner = 1; /*ACHTUNG Überprüfen!*/
    /*Das zurückgelieferte Ergebnis ist bei 1 noch um 'konversion'*/
```

```

/*geschoben und passt nicht in eine 32 Bit Int rein. ÜBERLAUF!*/
temp = zaehler << konversion;
/*temp = temp+nenner/2;*/
temp = (temp/nenner);
if (temp >2147483647) temp = 2147483647; /*Wenn temp nicht mehr in 32
Bit passt dann maximal von 2exp16 / 2 - 1*/
if (temp <-2147483647) temp = -2147483647; /*Wenn temp nicht mehr in
32 Bit passt dann maximal von -2exp16 / 2*/
return (int)temp;
}

/*Eine 32 Bit Integer negieren. Für all emit "Int" definierten Zahlen im
DSP*/
int zweierkomplement32(int a){
return ((a ^ 0xFFFFFFFF) + 1);
}

```

clarktransformation.h

```

#ifndef _CLARKTRANSFORMATION_H_
#define _CLARKTRANSFORMATION_H_
void clarktransformation_symmetrisch(_stDatenInDreiAchsen
*,_stDatenInFesteAchsen *);
void clarktransformation_unsymmetrisch(_stDatenInDreiAchsen
*,_stDatenInFesteAchsen *);
#endif

```

/* EOF */

clarktransformation.c

```

/*****
Funktionsname Name: Clarktransformation
C-File-Name: clarktransformation.c
Benötigte Headers: trigo.h, arithmetik.h, main.h
<Function interface>
*****/
#include "arithmetik.h"
#include "trigo.h"
#include "main.h"

/*Eingabedaten für die Transformation müssen im Formt Qm.n übergeben wer-
den. Ausgabewerte werden im Format Qm.n Zurückgegeben. Achtung m + n <=
16*/
/*Für Motorenbetrieb bzw. symmetrische Lasten*/
void clarktransformation_symmetrisch(_stDatenInDreiAchsen *eingabewerte,
_stDatenInFesteAchsen *ausgabewerte)
{
    ausgabewerte->alpha = eingabewerte->u_phas;
    ausgabewerte->beta = mull6(eingabewerte-
>u_phas,EINSDURCHSQRT3,SCHIEBEN) + mull6(eingabewerte-
>v_phas,ZWEIDURCHSQRT3,SCHIEBEN);
    ausgabewerte->theta = trigo_arctan(ausgabewerte->beta,
ausgabewerte->alpha);
}

/*Funktion für den Wechselrichterbetrieb Eingabewerte sind zwei Zeiger
auf Strukturen*/
void clarktransformation_unsymmetrisch(_stDatenInDreiAchsen
*eingabewerte, _stDatenInFesteAchsen *ausgabewerte)
{

```

```

    ausgabewerte->alpha = mul16(eingabewerte-
>u_phas,ZWEIDRITTEL,SCHIEBEN) - mul16(eingabewerte-
>v_phas,EINDRITTEL,SCHIEBEN) - mul16(eingabewerte-
>w_phas,EINDRITTEL,SCHIEBEN);
    ausgabewerte->beta  = mul16(eingabewerte-
>v_phas,EINSDURCHSQRT3,SCHIEBEN) - mul16(eingabewerte-
>w_phas,EINSDURCHSQRT3,SCHIEBEN);
    ausgabewerte->gamma = mul16(eingabewerte-
>u_phas,ZWEIDRITTEL,SCHIEBEN) + mul16(eingabewerte-
>v_phas,EINDRITTEL,SCHIEBEN) + mul16(eingabewerte-
>w_phas,EINDRITTEL,SCHIEBEN);
    ausgabewerte->theta = trigo_arctan(ausgabewerte->beta,
    ausgabewerte->alpha);
}
/**** EOF ****/

```

normierung.h

```

#ifndef _CLARKTRANSFORMATION_H_
#define _CLARKTRANSFORMATION_H_

void clarktransformation_symmetrisch(_stDatenInDreiAchsen
*,_stDatenInFesteAchsen *);
void clarktransformation_unsymmetrisch(_stDatenInDreiAchsen
*,_stDatenInFesteAchsen *);

#endif

```

normierung.c

```

/*****
Normierung WR Betrieb
*****/

#include "main.h"
#include "arithmetik.h"

extern      struct
{
    short kanal1;    /*Rohdaten Spannung U*/
    short kanal2;    /*Rohdaten Spannung V*/
    short kanal3;    /*Rohdaten Spannung W*/
    short kanal4;    /*noch Frei*/
    short kanal5;    /*Rohdaten Spannung UZK*/
    short kanal6;    /*Rohdaten Strom W*/
    short kanal7;    /*Rohdaten Strom V*/
    short kanal8;    /*Rohdaten Strom U*/
    short update;    /*Daten werden Verarbeitet und in eigene
Struktur geschrieben. Wert wird auf 0 Gesetzt wenn dies geschehen ist.
Nach neuer Wandlung wird wieder auf 1 gesetzt*/
} stADCDaten;

/*extern _stDatenInDreiAchsen      stDreiPhasenNetzSpannung;
extern _stDatenInDreiAchsen      stDreiPhasenNetzStrom;
extern _stSystemParameter        stSystemParameter;
extern _stDatenInFesteAchsen     stAlphaBetaNetzSpannung;*/

void messwertverteilung(_stDatenInDreiAchsen *spannungen,
_stDatenInDreiAchsen *stroeme, _stSystemParameter *zwischenkreis)
{
    spannungen->u_phas = di-
vil6(stADCDaten.kanal1, SPANNUNG_UVW, 14);

```

```

        spannungen->v_phas = di-
vil6(stADCDaten.kanal2, SPANNUNG_UVW, 14);
        spannungen->w_phas = di-
vil6(stADCDaten.kanal3, SPANNUNG_UVW, 14);

        zwischenkreis->zwischenkreisspannung = di-
vil6(stADCDaten.kanal5, SPANNUNG_UZK, 14);

        stroeme->u_phas = divil6(stroeme->u_phas, STROM_UVW, 15);
        stroeme->v_phas = divil6(stroeme->v_phas, STROM_UVW, 15);
        stroeme->w_phas = divil6(stroeme->w_phas, STROM_UVW, 15);
    }

void strommittel(_stDatenInDreiAchsen *ausgabe)
{
    int sum_u = 0, sum_v = 0, sum_w = 0, counts = 1;
    while(!(flag && t_ein)) /*Solange ausfuehren bis ein Interrupt
kommt*/
    {
        ADC_read();
        if(stADCDaten.update==1) /*Wenn neue Messwerte vom Wandlaer vor-
liegen globale Variable auslesen*/
        {
            sum_u += stADCDaten.kanal8;
            sum_v += stADCDaten.kanal7;
            sum_w += stADCDaten.kanal6;
            counts++;
            stADCDaten.update = 0;
        }
    }
    ausgabe->u_phas = sum_u / counts;
    ausgabe->v_phas = sum_v / counts;
    ausgabe->w_phas = sum_w / counts;
}

void gleichrichtwert(_stDatenInDreiAchsen *inout)
{
    static short gleich_IU[200], gleich_IV[200], gleich_IW[200];
    static int summe_IU=0, summe_IV=0, summe_IW = 0, position=0;

    summe_IU -= gleich_IU[position];
    summe_IV -= gleich_IV[position];
    summe_IW -= gleich_IW[position];

    gleich_IU[position] = inout->u_phas;
    gleich_IV[position] = inout->v_phas;
    gleich_IW[position] = inout->w_phas;

    summe_IU += gleich_IU[position];
    summe_IV += gleich_IV[position];
    summe_IW += gleich_IW[position];

    position++;
    if (position >= 200) position = 0;

    inout->u_phas -= summe_IU / 200;
    inout->v_phas -= summe_IV / 200;
    inout->w_phas -= summe_IW / 200;
}

```



```

}

void gleichrichtwert_DQ(_stDatenInRotierendeAchsen *inout)
{
    static int gleich_ID[200], gleich_IQ[200];
    static int summe_ID=0, summe_IQ = 0, zaehler=0;

    summe_ID -= gleich_ID[zaehler];
    summe_IQ -= gleich_IQ[zaehler];

    gleich_ID[zaehler] = inout->d_part;
    gleich_IQ[zaehler] = inout->q_part;

    summe_ID += gleich_ID[zaehler];
    summe_IQ += gleich_IQ[zaehler];

    zaehler++;
    if (zaehler >= 200) zaehler = 0;

    inout->d_part = summe_ID / 200;
    inout->q_part = summe_IQ / 200;
}

/*****
Funktion benötigt die Alpha- und Beta-Werte vom Netz und vom Regleraus-
gang
die Rücktransformierten Alpha- Beta-Werte
Für die Funktion RZM werden die Alpha- und Beta-Werte auf das Format
Q1.15
normiert
*****/

void normierung(_stDatenInFesteAchsen *netz_ct, _stSystemParameter
*rzm_parameter)
{
    int hilf = 0;
    int hilf_alpha_n = 0;
    int hilf_alpha_r = 0;
    int hilf_beta_n = 0;
    int hilf_beta_r = 0;

    /* Normierung vom Netz für alpha auf Q1.15*/
    hilf = mul16(netz_ct->alpha, SQRT3HALBE, SCHIE-
BEN); /* Q10.6 */
    hilf_alpha_n = mul16(hilf, rzm_parameter-
>uebersetzungsverhaeltniss, 15); /* Q10.6 */
    hilf = div16(rzm_parameter-
>zwischenkreisspannung, SQRT3, SCHIEBEN); /* Q12.4 */
    rzm_parameter->rzm_alpha = divi32(hilf_alpha_n, hilf, 13);
    /* Q10.6 / Q12.4 = Q1.15*/

    /* Normierung für Alpha von der Regelung auf das Format Q1.15 und
Addition zu den Wert vom Netz */
    hilf_alpha_r = divi32(rzm_parameter-
>zwischenkreisspannung, SQRT3, SCHIEBEN); /* Q12.4 */
    rzm_parameter->rzm_alpha += divi32(rzm_parameter-
>regler_alpha, hilf_alpha_r, 8); /* Q5.11 / Q12.4 = Q1.15*/

    /* Normierung vom Netz für beta auf Q1.15*/

```

```

        hilf                                = mull16(netz_ct->beta, SQRT3HALBE, SCHIE-
BEN); /* Q10.6 */
        hilf_beta_n                        = mull16(hilf,rzm_parameter-
>uebersetzungsverhaeltniss,15); /* Q10.6 */
        hilf                                = divi16(rzm_parameter-
>zwischenkreisspannung,SQRT3,SCHIEBEN); /* Q12.4 */
        rzm_parameter->rzm_beta           = divi32(hilf_beta_n,hilf,13);      /*
Q10.6 / Q12.4 = Q1.15*/

        /* Normierung für beta von der Regelung auf das Format Q1.15 und Ad-
dition zu den Wert vom Netz */
        hilf_beta_r                        = divi32(rzm_parameter-
>zwischenkreisspannung,SQRT3,SCHIEBEN); /* Q12.4 */
        rzm_parameter->rzm_beta           += divi32(rzm_parameter-
>regler_beta,hilf_beta_r,8); /* Q5.11 / Q12.4 = Q1.15*/
    }
parktransformation.h
#ifndef _PARKTRANSFORMATION_H_
#define _PARKTRANSFORMATION_H_
void park_symmetrisch(_stDatenInFesteAchsen *, _stDatenInRotierendeAchsen
*);
void invers_park_symmetrisch(_stDatenInRotierendeAchsen *,
_stDatenInFesteAchsen *);
void park_unsymmetrie(_stDatenInFesteAchsen *, _stDatenInRotierendeAchsen
*, _stDatenInFesteAchsen *);
void invers_park_unsymmetrie(int , int, _stSystemParameter *,
_stDatenInFesteAchsen *);
#endif
/* EOF*/

parktransformation.c
#include "main.h"
#include "arithmetik.h"
#include "trigo.h"
/*****
----- Funktionen für Asynchronmotor-----
Beim Funktionsaufruf ist darauf zu achten, dass in der Struktur
_stDatenInFesteAchsen der Drehwinkel theta ermittelt werden muss
Dieser muss vom Lagegeber oder aus dem Modell der Asynchronmaschine
ermittelt werden und vor dem Aufruf der Funktion in die Struktur
für die Eingabewerte abgespeichert werden.
Das Eingabeformat ist eine Vorzeichenbehaftete 16Bit Zahl gespeichert
in einer 32Bit Variablen. Ausgabeformat ist eine 32Bit Variable
zurückgeschoben auf das Eingabeformat
rein (Qn.m) -> raus (Qn.m).
*****/
void park_symmetrisch(_stDatenInFesteAchsen *eingabewerte,
_stDatenInRotierendeAchsen *ausgabewerte)
{
    ausgabewerte->d_part = mull16(trigo_cos(eingabewerte->theta),eingabewerte
->alpha, 15) + mull16(trigo_sin(eingabewerte->theta), eingabewerte->beta,
15);
    ausgabewerte->q_part = mull16(trigo_cos(eingabewerte->theta),eingabewerte
->beta, 15) - mull16(trigo_sin(eingabewerte->theta), eingabewerte->alpha,
15);
    ausgabewerte->theta = eingabewerte->theta;
}
/*Eingabewerte: Rotierendes Koordinatensystem nach Parktransformation
Ausgabewerte: Ständerfestes Koordinatensystem in Clarktransformation
Auf Richtigen Winkel für die Rücktransformation achten. Winkel ist in der
Eingabestruktur zu hinterlegen.*/

```

```

void invers_park_symmetrisch(_stDatenInRotierendeAchsen *eingabewerte,
_stDatenInFesteAchsen *ausgabewerte) {
ausgabewerte->alpha = mull6(trigo_cos(eingabewerte->theta),eingabewerte
->d_part, 15) - mull6(trigo_sin(eingabewerte->theta), eingabewerte
->q_part, 15);
ausgabewerte->beta = mull6(trigo_sin(eingabewerte->theta),eingabewerte
->d_part, 15) + mull6(trigo_cos(eingabewerte->theta), eingabewerte
->q_part, 15);
}
/*****
----- Funktion für Wechselrichterbetrieb -----
Funktionsaufruf durch
park_unsymmetrie(&stParkKomponenteStrom, &stAlphaBetaNetzStrom,
&stAlphaBetaNetzSpannung);
invers_park_unsymmetrie(stPID_Regler_D.stellwert,
stPID_Regler_Q.stellwert, &stSystemParameter, &stAlphaBetaNetzSpannung);
Funktion berechnet mit Drehwinkel der Spannung die Parkkomponenten des
Stromes.
*****/
void park_unsymmetrie(_stDatenInFesteAchsen *eingabewerte,
_stDatenInRotierendeAchsen *ausgabewerte, _stDatenInFesteAchsen *winkel)
{
ausgabewerte->d_part = mull6(trigo_cos(winkel->theta),eingabewerte
->alpha,15) + mull6(trigo_sin(winkel->theta),eingabewerte->beta,15);
ausgabewerte->q_part = mull6(trigo_cos(winkel->theta),eingabewerte-
>beta,15) - mull6(trigo_sin(winkel->theta),eingabewerte->alpha,15);
ausgabewerte->null = eingabewerte->gamma;
}
void invers_park_unsymmetrie(int d_part, int q_part, _stSystemParameter
*sysparameter, _stDatenInFesteAchsen *winkel)
{
sysparameter->regler_alpha = mul32(trigo_cos(winkel->theta),d_part,15)
- mul32(trigo_sin(winkel->theta),q_part,15);
sysparameter->regler_beta = mul32(trigo_cos(winkel->theta),q_part,15)
+ mul32(trigo_sin(winkel->theta),d_part,15);
/*ausgabewerte->gamma = eingabewerte->null;*/
}
/* EOF */

```

trigo.h

```

#ifndef _TRIGO_H_
#define _TRIGO_H_
#define MAX_SINUSLISTE 1024
/* Funktionsprototypen */
int trigo_sin(unsigned int);
int trigo_cos(unsigned int);
int trigo_arctan(int, int); /*Zähler und Nenner */
/*int trigo_tan(int);*/
#endif
/* EOF */

```

trigo.c

```

/*trigo.c Zum Berechnen der Winkel von cos- und sin- und der atan-
Funktion*/
#include <math.h>
#include "trigo.h"
#include "trigo_definitionen.h"
#include "arithmetik.h"
extern unsigned int sin_liste[];
/*****
Funktionname: trigo_sin
Eingabewert: Unsigned Integer 16 Bit

```

```

Rückgabewert: Integer 16Bit
Funktion sucht den passenden Sinus einer Integervariablen aus einem Array
hervor. Auflösung entspricht  $(\pi/2)/1024 = 0,00153398078789$  rad bzw.
0,087890625 grad
*****/
int trigo_sin(unsigned int winkel) {
    static unsigned int listenende = MAX_SINUSLISTE;
    int returnvalue;
    while ( winkel > (4*(listenende)-5)) {      /*Wenn Eingabewinkel größer
    2PI in den Bereich von 2PI anpassen*/
        winkel -= (4*(listenende) - 4); /*ACHTUNG !!! ist ja nicht auf 2 pi
        angepasst, sondern nur pi4 */
    }
    if(winkel < MAX_SINUSLISTE)/* 1. Quadrant*/
        return sin_liste[winkel];
    if(winkel > (MAX_SINUSLISTE - 1) && winkel <= (2*(MAX_SINUSLISTE) - 2))
/* 2. Quadrant*/
        return sin_liste[(2*MAX_SINUSLISTE - 2) - winkel];
    if(winkel > (2*(MAX_SINUSLISTE) - 2) && winkel <= (3*(MAX_SINUSLISTE) - 3
    )) /* 3. Quadrant */
        return -sin_liste[winkel - (2*MAX_SINUSLISTE - 2)];
    /*if(winkel > (3*(MAX_SINUSLISTE)- 3) && winkel <= (4*(MAX_SINUSLISTE) -
    5))*/ /* 4. Quadrant*/
    return -sin_liste[(4*MAX_SINUSLISTE - 4) - winkel];

    /*****
Funktionname: trigo_cos
Eingabewert:  Unsigned Integer 16Bit
Rückgabewert: Integer 16Bit
Funktion sucht den passenden Cosinus einer Integervariablen aus einem
Array raus. Auflösung entspricht  $(\pi/2)/1024 = 0,00153398078789$  rad bzw.
0,087890625 grad. Benötigte Funktion ist trigo_sin
*****/
int trigo_cos(unsigned int winkel){
    int returnvalue;
    winkel = 1023 + winkel;
    returnvalue = trigo_sin(winkel);
    return returnvalue;
}
*****/
Funktionname: trigo_arctan
Eingabewert:  16Bit Nenner und 16Bit Teiler
Rückgabewert: Integer 16Bit Winkel (gespeichert in 32 Bit)
*****/
int trigo_arctan(int dividend, int divisor){
    /*****
Die Berechnung in float und mit der Funktion atan() wurde gewählt, weil
dieses weniger Rechenoperationen benötigt als das herraussuchen aus einem
array, wie das unten ausgegraut.
*****/
    if (divisor == 0) divisor = 1;      /*NULL abfangen*/
    float i = atan(((float)dividend)/((float)divisor));
    if((dividend>=0 && divisor<0) || (dividend<0 && divisor<=0))
    i += 3.141592653589793238462643383279;
    if(dividend<0 && divisor>0) i += 2*3.141592653589793238462643383279;
    return (int)(i/0.00153398978789);    /*noch keine Rundung vorgesehen*/

    /*****Beginn alte Funktion raussuchen über Array*****/
    /*****Deaktivierungsgrund: Berechnung über die *****/
    /*****Funktion atan() ist schneller und genauer *****/
    /*****Reaktivierung durch entfernen von "<SLASH>**dd ... dd**<SLASH>"
    von Zeile***/

```

```

/**dd static unsigned int listenende = MAX_SINUSLISTE; dd**/
/**dd int i=0; dd**/
/**dd int temp1=dividend, temp2=divisor, zwischenergebnis; dd**/
/**dd if(temp1<0) temp1 = zweierkomplement32(temp1); dd**/
/**dd if(temp2<0) temp2 = zweierkomplement32(temp2); dd**/
/**dd zwischenergebnis = divi16(temp1, temp2, 15); dd**/
/**dd dd**/
/**dd temp1 = 0; dd**/
/**dd temp2 = 0; dd**/
/**dd while (temp1 < zwischenergebnis && i <= 1023 ) dd**/
/**dd { dd**/
/**dd i++; dd**/
/**dd temp2=temp1; dd**/
/**dd temp1=tan_liste[i]; dd**/
/**dd } dd**/

/*Raussuchen des Winkels, welcher näher am Tabellenwert liegt*/
/**dd temp1 = temp1 - zwischenergebnis; dd**/ /*Differenz zum
errechneten Wert des Quotienten vom aktuellen Listenwert bestimmen*/
/**dd temp2 = zwischenergebnis - temp2; dd**/ /*Differenz zum
errechneten Wert des Quotienten vom vorherigen Listenwert bestimmen*/
/*Beide rechnungen sind so ausgelegt, das dass Ergebnis positiv sein
wird, somit kuss keine überprüfung auf negatives
Vorzeichen und die Bildung des Zweierkomplements erfolgen.*/
/**dd if(temp2<temp1) i =i-1; dd**/ /*Wenn die
Differenz zum vorherigen Wert kleiner ist, dann wird der vorhergehende
Winkel genommen*/
/*andernfalls bleibt es beim aktuellen Winkel*/
/**dd if((dividend<0 || divisor<0) && !(dividend<0 && divisor<0)) i =
i*(-1); dd**/
/**dd if(divisor==0) i=i + listenende; dd**/
/*Korrektur vom Winkel berechnen*/
/**dd if(((dividend>=0) && (divisor<0)) || ((dividend<0) &&
(divisor<=0))) i = i + (2*listenende-2); dd**/ /*PI Dazuaddieren*/
/**dd if((dividend<0)&&(divisor>0)) i = i + ((4*listenende-4));
dd**/ /* 2 PI Dazuaddieren*/
/**dd return i; dd**/
/***** Ende der deaktivierten Tangensfunktion über Array
*****/
}
/* EOF */

```

trigo_definitionen.h

```

/*Definition der Sinustabelle im Bereich von 0 bis PI/2 mit 1024 Werten*/
/*Sinusfunktion ist im Wertebereich [0;1] abgebildet. In Integer und
Multiplikation mit 1024 Auflösung von 976*10^-6*/
static unsigned int sin_liste[(unsigned int)MAX_SINUSLISTE]= {
0, 50, 100, 150, 201, 251, 301, 352, 402, 452, 503, 553, 603, 654, 704,
754, 804, 855, 905, 955, 1006, 1056, 1106, 1156, 1207, 1257, 1307, 1358,
1408, 1458, 1508, 1559, 1609, 1659, 1709, 1760, 1810, 1860, 1910, 1961,
2011, 2061, 2111, 2161, 2212, 2262, 2312, 2362, 2412, 2463, 2513, 2563,
2613, 2663, 2713, 2764, 2814, 2864, 2914, 2964, 3014, 3064, 3114, 3164,
3214, 3265, 3315, 3365, 3415, 3465, 3515, 3565, 3615, 3665, 3715, 3765,
3815, 3865, 3915, 3965, 4015, 4064, 4114, 4164, 4214, 4264, 4314, 4364,
4414, 4464, 4513, 4563, 4613, 4663, 4713, 4762, 4812, 4862, 4912, 4961,
5011, 5061, 5111, 5160, 5210, 5260, 5309, 5359, 5409, 5458, 5508, 5557,
5607, 5657, 5706, 5756, 5805, 5855, 5904, 5954, 6003, 6053, 6102, 6151,
6201, 6250, 6300, 6349, 6398, 6448, 6497, 6546, 6596, 6645, 6694, 6743,
6793, 6842, 6891, 6940, 6989, 7039, 7088, 7137, 7186, 7235, 7284, 7333,
7382, 7431, 7480, 7529, 7578, 7627, 7676, 7725, 7774, 7823, 7871, 7920,
7969, 8018, 8067, 8115, 8164, 8213, 8262, 8310, 8359, 8408, 8456, 8505,
8553, 8602, 8650, 8699, 8747, 8796, 8844, 8893, 8941, 8990, 9038, 9086,

```

9135, 9183, 9231, 9280, 9328, 9376, 9424, 9472, 9521, 9569, 9617, 9665,
9713, 9761, 9809, 9857, 9905, 9953, 10001, 10049, 10097, 10145, 10192,
10240, 10288, 10336, 10383, 10431, 10479, 10526, 10574, 10622, 10669,
10717, 10764, 10812, 10859, 10907, 10954, 11002, 11049, 11096, 11144,
11191, 11238, 11286, 11333, 11380, 11427, 11474, 11521, 11569, 11616,
11663, 11710, 11757, 11804, 11850, 11897, 11944, 11991, 12038, 12085,
12131, 12178, 12225, 12271, 12318, 12365, 12411, 12458, 12504, 12551,
12597, 12644, 12690, 12737, 12783, 12829, 12876, 12922, 12968, 13014,
13060, 13106, 13153, 13199, 13245, 13291, 13337, 13383, 13428, 13474,
13520, 13566, 13612, 13658, 13703, 13749, 13795, 13840, 13886, 13931,
13977, 14022, 14068, 14113, 14159, 14204, 14249, 14295, 14340, 14385,
14430, 14475, 14521, 14566, 14611, 14656, 14701, 14746, 14791, 14836,
14880, 14925, 14970, 15015, 15059, 15104, 15149, 15193, 15238, 15282,
15327, 15371, 15416, 15460, 15504, 15549, 15593, 15637, 15681, 15726,
15770, 15814, 15858, 15902, 15946, 15990, 16034, 16078, 16121, 16165,
16209, 16253, 16296, 16340, 16384, 16427, 16471, 16514, 16557, 16601,
16644, 16688, 16731, 16774, 16817, 16860, 16904, 16947, 16990, 17033,
17076, 17119, 17161, 17204, 17247, 17290, 17333, 17375, 17418, 17461,
17503, 17546, 17588, 17630, 17673, 17715, 17758, 17800, 17842, 17884,
17926, 17968, 18010, 18052, 18094, 18136, 18178, 18220, 18262, 18304,
18345, 18387, 18429, 18470, 18512, 18553, 18595, 18636, 18678, 18719,
18760, 18801, 18843, 18884, 18925, 18966, 19007, 19048, 19089, 19130,
19170, 19211, 19252, 19293, 19333, 19374, 19414, 19455, 19495, 19536,
19576, 19616, 19657, 19697, 19737, 19777, 19817, 19857, 19897, 19937,
19977, 20017, 20057, 20097, 20136, 20176, 20216, 20255, 20295, 20334,
20374, 20413, 20452, 20492, 20531, 20570, 20609, 20648, 20687, 20726,
20765, 20804, 20843, 20882, 20921, 20959, 20998, 21037, 21075, 21114,
21152, 21191, 21229, 21267, 21305, 21344, 21382, 21420, 21458, 21496,
21534, 21572, 21610, 21647, 21685, 21723, 21761, 21798, 21836, 21873,
21911, 21948, 21985, 22023, 22060, 22097, 22134, 22171, 22208, 22245,
22282, 22319, 22356, 22393, 22429, 22466, 22503, 22539, 22576, 22612,
22648, 22685, 22721, 22757, 22793, 22830, 22866, 22902, 22938, 22973,
23009, 23045, 23081, 23117, 23152, 23188, 23223, 23259, 23294, 23330,
23365, 23400, 23435, 23470, 23505, 23541, 23575, 23610, 23645, 23680,
23715, 23750, 23784, 23819, 23853, 23888, 23922, 23956, 23991, 24025,
24059, 24093, 24127, 24161, 24195, 24229, 24263, 24297, 24331, 24364,
24398, 24432, 24465, 24498, 24532, 24565, 24598, 24632, 24665, 24698,
24731, 24764, 24797, 24830, 24862, 24895, 24928, 24961, 24993, 25026,
25058, 25090, 25123, 25155, 25187, 25219, 25252, 25284, 25316, 25347,
25379, 25411, 25443, 25475, 25506, 25538, 25569, 25601, 25632, 25663,
25695, 25726, 25757, 25788, 25819, 25850, 25881, 25912, 25942, 25973,
26004, 26034, 26065, 26095, 26126, 26156, 26186, 26217, 26247, 26277,
26307, 26337, 26367, 26397, 26426, 26456, 26486, 26515, 26545, 26574,
26604, 26633, 26662, 26692, 26721, 26750, 26779, 26808, 26837, 26866,
26894, 26923, 26952, 26980, 27009, 27037, 27066, 27094, 27122, 27150,
27179, 27207, 27235, 27263, 27290, 27318, 27346, 27374, 27401, 27429,
27456, 27484, 27511, 27538, 27566, 27593, 27620, 27647, 27674, 27701,
27728, 27755, 27781, 27808, 27834, 27861, 27887, 27914, 27940, 27966,
27993, 28019, 28045, 28071, 28097, 28123, 28148, 28174, 28200, 28225,
28251, 28276, 28302, 28327, 28352, 28377, 28403, 28428, 28453, 28478,
28502, 28527, 28552, 28577, 28601, 28626, 28650, 28674, 28699, 28723,
28747, 28771, 28795, 28819, 28843, 28867, 28891, 28915, 28938, 28962,
28985, 29009, 29032, 29055, 29079, 29102, 29125, 29148, 29171, 29194,
29217, 29239, 29262, 29285, 29307, 29330, 29352, 29374, 29397, 29419,
29441, 29463, 29485, 29507, 29529, 29550, 29572, 29594, 29615, 29637,
29658, 29680, 29701, 29722, 29743, 29764, 29785, 29806, 29827, 29848,
29869, 29889, 29910, 29930, 29951, 29971, 29992, 30012, 30032, 30052,
30072, 30092, 30112, 30132, 30151, 30171, 30191, 30210, 30230, 30249,
30268, 30288, 30307, 30326, 30345, 30364, 30383, 30402, 30420, 30439,
30458, 30476, 30494, 30513, 30531, 30549, 30568, 30586, 30604, 30622,
30639, 30657, 30675, 30693, 30710, 30728, 30745, 30763, 30780, 30797,
30814, 30831, 30848, 30865, 30882, 30899, 30916, 30932, 30949, 30965,

```

30982, 30998, 31014, 31031, 31047, 31063, 31079, 31095, 31110, 31126,
31142, 31157, 31173, 31189, 31204, 31219, 31234, 31250, 31265, 31280,
31295, 31310, 31324, 31339, 31354, 31368, 31383, 31397, 31412, 31426,
31440, 31454, 31468, 31482, 31496, 31510, 31524, 31538, 31551, 31565,
31578, 31592, 31605, 31618, 31631, 31644, 31657, 31670, 31683, 31696,
31709, 31721, 31734, 31747, 31759, 31771, 31784, 31796, 31808, 31820,
31832, 31844, 31856, 31867, 31879, 31891, 31902, 31914, 31925, 31936,
31948, 31959, 31970, 31981, 31992, 32003, 32013, 32024, 32035, 32045,
32056, 32066, 32076, 32087, 32097, 32107, 32117, 32127, 32137, 32146,
32156, 32166, 32175, 32185, 32194, 32204, 32213, 32222, 32231, 32240,
32249, 32258, 32267, 32275, 32284, 32293, 32301, 32310, 32318, 32326,
32334, 32343, 32351, 32359, 32366, 32374, 32382, 32390, 32397, 32405,
32412, 32419, 32427, 32434, 32441, 32448, 32455, 32462, 32469, 32476,
32482, 32489, 32495, 32502, 32508, 32514, 32521, 32527, 32533, 32539,
32545, 32550, 32556, 32562, 32567, 32573, 32578, 32584, 32589, 32594,
32599, 32604, 32609, 32614, 32619, 32624, 32629, 32633, 32638, 32642,
32646, 32651, 32655, 32659, 32663, 32667, 32671, 32675, 32679, 32682,
32686, 32689, 32693, 32696, 32699, 32703, 32706, 32709, 32712, 32715,
32717, 32720, 32723, 32725, 32728, 32730, 32733, 32735, 32737, 32739,
32741, 32743, 32745, 32747, 32749, 32750, 32752, 32754, 32755, 32756,
32758, 32759, 32760, 32761, 32762, 32763, 32764, 32764, 32765, 32766,
32766, 32767, 32767, 32767, 32767, 32767, 32768};
/* EOF */

```

PID_Regler.h

```

#ifndef _PID_REGLER_H_
#define _PID_REGLER_H_
#define P_REG_Y_MAX 32767
#define I_REG_Y_MAX 32767
#define D_REG_Y_MAX 32667
int PID_regler(_stPID_Regler *);
#endif
/* EOF */

```

PID_Regler.c

```

#include "main.h"
#include "arithmetik.h"
#include "PID_Regler.h"

int PID_regler(_stPID_Regler *reglerwerte)
{
    static int e_k, epro, eint, edif;
    e_k = reglerwerte->sollwert - (reglerwerte->istwert);
    epro = e_k;
    /*Begrenzung der P-Abweichung */
    if (epro < -(P_REG_Y_MAX)) {epro = -(P_REG_Y_MAX);}
    if (epro > P_REG_Y_MAX) {epro = P_REG_Y_MAX;}

    eint = e_k;
    /*Begrenzung der I-Abweichung */
    if (eint < -(I_REG_Y_MAX)) {eint = -(I_REG_Y_MAX);}
    if (eint > I_REG_Y_MAX) {eint = I_REG_Y_MAX;}

    //edif = e_k - reglerwerte->e_k_minus_1;
    /*Begrenzung des D-Abweichung */
    /*if (edif < -(D_REG_Y_MAX)) { edif = -(D_REG_Y_MAX);}
    if (edif > D_REG_Y_MAX) { edif = D_REG_Y_MAX;}*/

    reglerwerte->p_anteil = mul32(reglerwerte->kp, epro, 15);
    /*Begrenzung des P-Anteils */
    if (reglerwerte->p_anteil < -(PA_MAX)) {reglerwerte->p_anteil = -
(PA_MAX);}

```

```

        if (reglerwerte->p_anteil > PA_MAX) {reglerwerte->p_anteil =
PA_MAX;}

        reglerwerte->i_anteil = reglerwerte->i_anteil
        + mul32(mul16(reglerwerte->ki, eint, 4), reglerwerte-
>abtastzeit, 24);
        /*Begrenzung des I-Anteils */
        if (reglerwerte->i_anteil < -(IA_MAX)) {reglerwerte->i_anteil = -(
IA_MAX);}
        if (reglerwerte->i_anteil > IA_MAX) {reglerwerte->i_anteil = IA_MAX;}

        /*reglerwerte->d_anteil = 0;*/divi32(mul16(reglerwerte->kd, (edif),
0), reglerwerte->abtastzeit, 24 );*/
        /*Begrenzung des I-Anteils */
        /*if (reglerwerte->d_anteil < -(DA_MAX)) {reglerwerte->d_anteil = -(
DA_MAX);}
        if (reglerwerte->d_anteil > DA_MAX) {reglerwerte->d_anteil =
DA_MAX;}*/

switch (reglerwerte->modus)
{
    case 2: /* PI Regelung */
        reglerwerte->stellwert = reglerwerte->p_anteil + reglerwerte-
>i_anteil;
        /*Begrenzung der Stellgröße */
        if (reglerwerte->stellwert < -(SG_MAX)) {reglerwerte->stellwert = -(
SG_MAX);}
        if (reglerwerte->stellwert > SG_MAX) {reglerwerte->stellwert =
SG_MAX;}
        break;

    case 3: /* PID Regelung */
        reglerwerte->stellwert = reglerwerte->p_anteil + reglerwerte-
>i_anteil + reglerwerte->d_anteil;
        /*Begrenzung der Stellgröße */
        if (reglerwerte->stellwert < -(SG_MAX)) {reglerwerte->stellwert = -(
SG_MAX);}
        if (reglerwerte->stellwert > SG_MAX) {reglerwerte->stellwert =
SG_MAX;}
        break;

    default: /* P Regelung */
        reglerwerte->stellwert = reglerwerte->p_anteil;
        if (reglerwerte->stellwert < -(SG_MAX)) {reglerwerte->stellwert = -(
SG_MAX);}
        if (reglerwerte->stellwert > SG_MAX) {reglerwerte->stellwert =
SG_MAX;}
        break;
}
reglerwerte->e_k_minus_1 = e_k;
return 0;
}

/* EOF */

```

main.c

```

/*****
****
*
*Wechselrichter
*

```



```

*Nick Meyer
*

*****
****/
#include "main.h"
#include "inbetriebnahme.h"
#include "clarktransformation.h"
#include "parktransformation.h"
#include "arithmetik.h"
#include "normierung.h"
#include "PID_Regler.h"

volatile char flag = 0, ein = 0, t_ein = 0; // flag für Zeit-Interrupt 100
µs, "ein" für

//

Betriebszustand
int i; // Temp-
Variable

volatile int alpha, beta, betrag_alpha, betrag_beta, u;
volatile int U_ein, V_ein, W_ein;
volatile int spannung_U1[1000], spannung_U2[1000], spannung_UZK[1000] ,
strom_U1[1000], strom_U2[1000], strom_U3[1000], strom_U_zeiger;
volatile short adc[8];

_stDatenInDreiAchsen      stDreiPhasenNetzSpannung = {0, 0, 0};
_stDatenInDreiAchsen      stDreiPhasenNetzStrom = {0, 0, 0};
_stDatenInFesteAchsen     stAlphaBetaNetzSpannung = {0, 0, 0, 0};
_stDatenInFesteAchsen     stAlphaBetaNetzStrom = {0, 0, 0, 0};
_stDatenInRotierendeAchsen stParkKomponenteStrom = {0, 0, 0};
_stSystemParameter        stSystemParameter = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0};
_stPID_Regler              stPID_Regler_D = {0, 0, 0, 0, REG_ABTAZSTZEIT,
STROM_KP*0.5*0.5, STROM_KI*0.5*0.5, STROM_KD, 20, 0, 0, 2};
_stPID_Regler              stPID_Regler_Q = {0, 0, 0, 0, REG_ABTAZSTZEIT,
STROM_KP*0.5*0.5*0.5, STROM_KI*0.5*0.5*0.5, STROM_KD*0.5*0.5*0.5, 1000,
0, 0, 2};

struct
{
    short kanal1;    /*Spannung U*/
    short kanal2;    /*Spannung V*/
    short kanal3;    /*Spannung W*/
    short kanal4;    /*noch Frei*/
    short kanal5;    /*Spannung ZK*/
    short kanal6;    /*Strom W*/
    short kanal7;    /*Strom V*/
    short kanal8;    /*Strom U*/
    short update;    /*Daten werden Verarbeitet und in eigene
Struktur geschrieben.

Wert wird auf 0 Gesetzt wenn
dies geschehen ist. Nach neuer
Wandlung wird wieder auf 1
gesetzt*/
} stADCDaten;

// ***** HAUPTPROGRAMM*****
// *****

```

```

void main(void) {
    int ihighmax=0, ireset = 0, hilf;
    int sprungwert = 0;

    init(); // Ports, Timer und
Interrupts initialisieren

    inbetriebnehmen(); /* Testen auf Betriebsbereitschaft und */
    /**pPORTFIO_SET = RELAI2;
    *pPORTFIO_SET = FREIGABE; /* Freigaben und Regelung starten
    Freigabe wird bei Überstrom gelöscht */
    ADC_read();
    while(1) {

        if((*pTIMER4_COUNTER < 0x3938700) & (*pTIMER_ENABLE &
0x001F))
            *pPORTFIO_SET = LED6; //
blinken, wenn Programm
            else
            // und Timer laufen
            *pPORTFIO_CLEAR = LED6;

        while(!(flag && t_ein)); // auf
Interrupt warten

        RZM(stSystemParameter.rzm_alpha, stSystemParameter.rzm_beta);
        ADC_read();
        gleichrichtwert(&stDreiPhasenNetzStrom);
        messwertverteilung(&stDreiPhasenNetzSpannung,
&stDreiPhasenNetzStrom, &stSystemParameter);

        clarktransformation_unsymmetrisch(&stDreiPhasenNetzSpannung,
&stAlphaBetaNetzSpannung);
        clarktransformation_unsymmetrisch(&stDreiPhasenNetzStrom,
&stAlphaBetaNetzStrom);

        park_unsymmetrie(&stAlphaBetaNetzStrom,
&stParkKomponenteStrom, &stAlphaBetaNetzSpannung);

        /*****
    */
        /*Strombegrenzung Freigabe löschen wenn Maximalstrom um 3x
überschritten wird*/
        /*Zeit zum Reagieren = 3 durchläufe*/
        if(stPID_Regler_D.istwert > 12288|| stPID_Regler_Q.istwert >
12288)
        {
            ihighmax++;
            ireset = 0;
            if (ihighmax > 10)
            {
                *pPORTFIO_CLEAR = FREIGABE;
                *pPORTFIO_CLEAR = RELAI2;
                *pPORTFIO_CLEAR = RELAI1;
                while(1);
            }
        }
        if(stPID_Regler_D.istwert <= 10240 && stPID_Regler_Q.istwert <=
10240)
        {

```

```

        ireset++;
        if (ireset >= 40)
        {
            ireset = 0;
            ihighmax = 0;
        }
    }

/*****

//gleichrichtwert_DQ(&stParkKomponenteStrom);

stPID_Regler_D.istwert = stParkKomponenteStrom.d_part;
stPID_Regler_Q.istwert = stParkKomponenteStrom.q_part;

PID_regler(&stPID_Regler_D);
PID_regler(&stPID_Regler_Q);

//invers_park_unsymmetrie(4000, 0, &stSystemParameter,
&stAlphaBetaNetzSpannung);

invers_park_unsymmetrie(stPID_Regler_D.stellwert,
stPID_Regler_Q.stellwert, &stSystemParameter, &stAlphaBetaNetzSpannung);
normierung(&stAlphaBetaNetzSpannung, &stSystemParameter);

(stSystemParameter.rzm_alpha > 32767) ?
stSystemParameter.rzm_alpha = 32767 : stSystemParameter.rzm_alpha;
(stSystemParameter.rzm_alpha < -32767) ?
stSystemParameter.rzm_alpha = -32767 : stSystemParameter.rzm_alpha;
(stSystemParameter.rzm_beta > 32767) ?
stSystemParameter.rzm_beta = 32767 : stSystemParameter.rzm_alpha;
(stSystemParameter.rzm_beta < -32767) ?
stSystemParameter.rzm_beta = -32767 : stSystemParameter.rzm_alpha;

// Ausgabe an DAC zur Visualisierung am Oszi
hilf = abs(stPID_Regler_D.sollwert);
if (hilf > 32767) hilf = 32767;
DAC_A(hilf); // Daten senden (DAC A)
hilf = abs(stPID_Regler_D.istwert);
if (hilf > 32767) hilf = 32767;
DAC_B(hilf); // Daten senden (DAC B)

//stAlphaBetaNetzSpannung.alpha =
stSystemParameter.rzm_alpha;
//stAlphaBetaNetzSpannung.beta = stSystemParameter.rzm_beta;

/*-----Ausgabe auf Bildschirm-----
--*/

if(strom_U_zeiger==1000) {
    strom_U_zeiger=0;
    sprungwert++;
    if ((stPID_Regler_D.sollwert == 20) && sprungwert >=
40)
    {
        stPID_Regler_D.sollwert = 2000;
        stPID_Regler_Q.sollwert = 500;
        sprungwert = 0;
    }

    if ((stPID_Regler_D.sollwert == 2000) && sprungwert >=
40)

```

```

        {
            stPID_Regler_D.sollwert = 20;
            stPID_Regler_Q.sollwert = 1;
            sprungwert = 0;
        }

    }

    spannung_U1[strom_U_zeiger] = stParkKomponenteStrom.d_part;
    spannung_U2[strom_U_zeiger] = stParkKomponenteStrom.q_part;
    spannung_UZK[strom_U_zeiger] = stAlphaBetaNetzStrom.theta;
    strom_U1[strom_U_zeiger] =
stAlphaBetaNetzStrom.alpha;//stParkKomponenteStrom.d_part;
    strom_U2[strom_U_zeiger] =
stAlphaBetaNetzStrom.beta;//stParkKomponenteStrom.q_part;
    strom_U3[strom_U_zeiger] =
stAlphaBetaNetzSpannung.theta;//stAlphaBetaNetzStrom.theta;
    strom_U_zeiger++;
/*-----
-*/

    flag = 0;
    strommittel(&stDreiPhasenNetzStrom);
}

// ***** ISR *****
// *****

// ***** ISR für Timer0 *****

EX_INTERRUPT_HANDLER(Timer0_ISR) {
    // confirm interrupt handling
    *pTIMER_STATUS = 0x0001;

    t_ein = ~t_ein;
    if(!t_ein) {
        *pTIMER1_WIDTH = U_ein;
        *pTIMER2_WIDTH = V_ein;
        *pTIMER3_WIDTH = W_ein;
    }
    else {
        *pTIMER1_WIDTH = ZWEI_T - U_ein;
        *pTIMER2_WIDTH = ZWEI_T - V_ein;
        *pTIMER3_WIDTH = ZWEI_T - W_ein;
    }
    flag = 1;
}

// ***** ISR für Tastendruck *****

/*EX_INTERRUPT_HANDLER(PORTF_IntA_ISR) {
    *pPORTFIO_CLEAR = TASTER;
    ein = ~ein;
    if(!ein) {
        *pTIMER_DISABLE = 0x001F;
        f = 0.1; rampe = 25;
    }
    else
        *pTIMER_ENABLE = 0x001F;
}

```

```

}*/

// ***** INITIALISIERUNGS-ROUTINEN *****
// *****

void init(void) {
    // ***** Initialisieren der Ports (PPI-Anschluß) *****

    // 16-bit-Parallelport für Dateneingang
    *pPORTG_FER = 0x0000;           // GPIO-Modus
    *pPORTGIO_DIR = 0x0000;        // Port als Eingang
    *pPORTGIO_INEN = 0xFFFF;      // Eingänge
    aktiviert

    // Steuerleitungen
    *pPORTF_FER = LED3 | LED2 | LED1 | CONVSTA_B; // TMRx-
    // Ausgänge zum Umrichter - Function Enabled Register kommt von Timer
    *pPORTFIO_DIR = RELAI2 | RELAI1 | RELAI3 | FREIGABE | LED1 | LED2 |
    LED3 | LED6 // Ausgänge werden vom Benutzer gesetzt ganz normal im
    Programmablauf

    // RESET | CS_RD | CONVSTA_B | RANGE | STBY;

    /*Beispielsweise
    // Relai 1 einschalten
    *pPORTFIO_SET = RELAI1;
    // Relai 1 ausschalten
    *pPORTFIO_CLEAR = RELAI1;*/

    *pPORTFIO_INEN = BUSY;           // Eingänge
    // *pPORTFIO_EDGE = TASTER;      // Interrupt auf
    steigende Flanke
    // *pPORTFIO_MASKA = TASTER;

    // ***** ADC INIT *****

    *pPORTFIO_SET = CS_RD | STBY | CONVSTA_B; // einschalten
    delay_us(100000);                       // 100 ms warten, bis
    initialisiert
    *pPORTFIO_SET = RESET;                   // kurzen Reset-Impuls erzeugen
    delay_85ns();
    *pPORTFIO_CLEAR = RESET;
    delay_85ns();
    set_ADC_range(10);                       //
    Eingangsspannungsbereich ±10 V

    // ***** SPORT0 INIT *****
    *pSPORT0_TCR1 = 0;
    *pSPORT0_TCR1 = ITCLK | ITFS | TFSR;
    *pSPORT0_TCR2 = Bitlaenge;
    *pSPORT0_TCLKDIV = Teiler;
    *pSPORT0_TFSDIV = Bitlaenge + 2;        // Pausenzeit vor
    nächstem Byte
    asm("ssync;");
    *pSPORT0_TCR1 |= TSPEN;                 // Sender einschalten
    asm("ssync;");

    // ***** DAC INIT *****
    while(*pSPORT0_STAT & TXF);             // warten, bis TX-Puffer leer

```

```

    *pSPORT0_TX = 0x280001;                // Software-Reset ("Power-on
Reset")

// ***** TIMER INIT *****
// Timer-Taktrate ist 1/5 Core-Clock, d.h. 120 MHz
// Timer für 100 µs Zykluszeit
    *pTIMER0_CONFIG = PWM_OUT | PERIOD_CNT | IRQ_ENA;
    *pTIMER0_PERIOD = 0x00001770;          // ergibt 10 kHz
Interruptrate
    *pTIMER0_WIDTH = 0x0000000A;

// PWM für LED3 = U
    *pTIMER1_CONFIG = PWM_OUT | PERIOD_CNT | TOGGLE_HI | PULSE_HI;
    *pTIMER1_PERIOD = 0x00001770;
    *pTIMER1_WIDTH = 0x00000001;

// PWM für LED2 = V
    *pTIMER2_CONFIG = PWM_OUT | PERIOD_CNT | TOGGLE_HI | PULSE_HI;
    *pTIMER2_PERIOD = 0x00001770;
    *pTIMER2_WIDTH = 0x00000001;

// PWM für LED1 = W
    *pTIMER3_CONFIG = PWM_OUT | PERIOD_CNT | TOGGLE_HI | PULSE_HI;
    *pTIMER3_PERIOD = 0x00001770;
    *pTIMER3_WIDTH = 0x00000001;

// Timer für Blink-LED (1 Hz)
    *pTIMER4_CONFIG = PWM_OUT | PERIOD_CNT | OUT_DIS;
    *pTIMER4_PERIOD = 0x07270E00;
    *pTIMER4_WIDTH = 0x03938700;

// ***** INTERRUPT INIT *****

// assign core IDs to interrupts
    *pSIC_IAR0 = 0xffffffff;
    *pSIC_IAR1 = 0xffffffff;
    *pSIC_IAR2 = 0xffff4fff;              // Timer0 -> ID4; Timer2, Timer 3
    *pSIC_IAR3 = 0xffffffff;              // PORTF IVG12

// assign ISRs to interrupt vectors
    register_handler(ik_ivg11, Timer0_ISR);          // Timer0 ISR -> IVG
11 //register_handler(ik_ivg12,PORTF_IntA_ISR);

// Interrupt Timer0 einschalten
    *pSIC_IMASK = 0x08080000;
// Timer einschalten
    *pTIMER_ENABLE = 0x001F;
}

// ***** ADC auslesen *****
// *****

void ADC_read(void) {
    int i;

    while(*pPORTFIO & BUSY);                // warten, bis fertig gewandelt

```

```

        for(i=0; i<8;i++) {
            *pPORTFIO_CLEAR = CS_RD;
            delay_85ns();
            adc[i] = *pPORTGIO;           // alle 8 Kanäle nach
adc[] auslesen
            *pPORTFIO_SET = CS_RD;
            delay_85ns();
        }
/*    for(i=0;i<8;i++)
        adc[i] = adc[i] - 0x8000 & 0xFFFF;*/

    stADCDaten.kanal1 = adc[0];
    stADCDaten.kanal2 = adc[1];
    stADCDaten.kanal3 = adc[2];
    stADCDaten.kanal4 = adc[3];
    stADCDaten.kanal5 = adc[4];
    stADCDaten.kanal6 = adc[5];
    stADCDaten.kanal7 = adc[6];
    stADCDaten.kanal8 = adc[7];
    stADCDaten.update = 1;
}

// ***** EINGANGSSPANNUNGSBEREICH WÄHLEN *****
// Übergabewert: Eingangsspannungsbereich (5 oder 10 für 5 V bzw. 10 V)
// *****

void set_ADC_range(unsigned char v_range) {
    switch(v_range) {
        case 5:
            *pPORTFIO_CLEAR = RANGE;
            break;

        case 10:
            *pPORTFIO_SET = RANGE;
            break;

        default:
            while(1);           // Fehlerschleife bei falschem
Übergabewert
    }
}

// ***** VERZÖGERUNGS-ROUTINEN *****
// *****

// Übergabewert: Verzögerungszeit in µs
void delay_us(unsigned long int zeit) {
    int countup;
    for(countup=0; countup<DELAY_MUL*zeit; countup++)
        asm("nop;");
}

// feste Verzögerungszeit 85 ns
void delay_85ns(void) {
    for(i=0;i<4;i++)
        asm("nop;");
}

```

```

// ***** Daten an DAC senden *****
// Übergabewert: 16-bit (unsigned) int
// *****

// an DAC Kanal A senden
void DAC_A(int daten) {
    while(*pSPORT0_STAT & TXF); // warten, bis TX-Puffer leer
    *pSPORT0_TX = ((daten | KANAL_A) /*& 0x00FFFFFF*/); // Daten
    senden (DAC A)
}

// an DAC Kanal B senden
void DAC_B(int daten) {
    while(*pSPORT0_STAT & TXF); // warten, bis TX-Puffer leer
    *pSPORT0_TX = ((daten | KANAL_B) /*& 0x00FFFFFF*/); // Daten
    senden (DAC B)
}

```

main.h

```

#include <sys\exception.h>
#include <cdefBF537.h>
#include <math.h>

// ***** Definitionen für RZM *****
#define WURZEL3      56756 // (/2^15)
#define WURZEL3_REZ  37837 // (/2^16)
#define T_HALBE      0x0BB8 // 3000
#define ZWEI_T       0x1770 // 6000

#define DELAY_MUL 100
#define LED1      PF6      // W
#define LED2      PF7      // V
#define LED3      PF8      // U
#define LED6      PF11
#define FREIGABE  PF5 // Taster PB4

// ADC-Definitionen
#define RESET      PF15
#define CS_RD      PF10
#define CONVSTA_B  PF9
#define BUSY       PF13 // Eingang!
#define RANGE      PF14
#define STBY       PF12

// DAC-Definitionen
#define SYNCR      TFS0
#define DeviceAddr 0x7
#define Bitlaenge  23      // Datenbits - 1
#define Teiler     2//61    // ergibt 400 kHz Taktrate
#define TWI_Length 3       // 3 Bytes
#define KANAL_A    0x00180000
#define KANAL_B    0x00190000

// ***** Funktions-Prototypen *****
void init(void); // Initialisierungs-
Routinen
void delay_us(unsigned long int zeit); // variable
Verzögerungszeit n µs

```



```

void delay_85ns(void); // feste Verzögerungszeit
85 ns
void RZM(int alpha, int beta); // Raumzeigermodulation
void alphabeta(int f); // Erzeugung von Us_alpha und
Us_beta
void ADC_read(void); // ADC auslesen
void set_ADC_range(unsigned char v_range); //
Eingangsspannungsbereich wählen
void DAC_A(int); // Daten an DAC-Kanal A senden
void DAC_B(int); // Daten an DAC-Kanal B senden

// ***** Variablen *****
extern volatile char flag, ein, t_ein; // flag für Zeit-Interrupt 100 µs,
"ein" für

//

Betriebszustand
extern int i;

extern volatile int alpha, beta;
extern volatile int U_ein, V_ein, W_ein;

/***** N I C K *****/
*****/

#define SCHIEBEN 14 /* Realzahlen sind mit SCHIEBEN nach
links geschoben */
#define SQRT3 28378 /* Wurzel 3 geschoben mit SCHIEBEN */
#define EINSHALB 8192 /* 1/2 geschoben mit SCHIEBEN */
#define DREIHALBE 24576 /* 3/2 geschoben mit SCHIEBEN */
#define EINDRITTEL 5461 /* 1/3 geschoben mit SCHIEBEN */
#define ZWEIDRITTEL 10923 /* 2/3 geschoben mit SCHIEBEN */
#define SQRT3HALBE 14189 /* Wurzel 3 halbe geschoben mit SCHIEBEN
*/
#define EINS DURCHSQRT3 9459 /* Eins durch Wurzel 3 geschoben mit
SCHIEBEN */
#define ZWEI DURCHSQRT3 18919 /* Zwei durch Wurzel 3 geschoben mit
SCHIEBEN */
#define WURZEL2 DURCH3 13377 /* Wurzel(2 / 3) geschoben mit SCHIEBEN
*/
#define WURZEL3 DURCH3 9459 /* Wurzel(3) / 3 geschoben mit SCHIEBEN
*/

/***** Korrekturfaktoren & Stromgrenzwerte *****/
#define SPANNUNG_UVW 16776 /* Korrekturfaktor für die Netzspannung
geschoben mit SCHIEBEN (2.14f) */
#define SPANNUNG_UZK 22369 /* Korrekturfaktor für die
Zwischenkreisspannung geschoben mit SCHIEBEN (2.14f) */
#define STROM_UVW 2621 /* Korrekturfaktor für alle zu messenden
Ströme (2.15f) */
#define ITESTMAX 2000 /* Maximal möglicher Teststrom bei
korrektem Anschluss der Phasen Format Q5.11 */
#define ITESTMIN 100 /* Minimaler Strom der da sein muss um
zu sagen: Ja Wandler ist angeschlossen Q5.11 */
#define I_AUSGABE_MAX 40963 /* Strombegrenzung bei 10A Format
Q5.11 */

/*****
*****
Werte für Reglereinstellungen und Funktionsstruktur
*****
*****/

```

```

#define STROM_KP      66000          /* Proportionalverstärkung 10 ->
Q4.12*/
#define STROM_KI      100842         /* Integralverstärkung 4096 Q12.4*/
#define STROM_KD      1             /* Differentialanteil nicht in
Benutzung und nicht programmiert*/
#define REG_ABTAZTZEIT 1677          /* Abtastzeit der Regelung im Format
(Q8.24) */
#define SG_MAX        183040         /* Maximal mögliche Stellgröße = 3,75A
Q5.11 7680*/
#define PA_MAX        64000          /* Begrenzung P Anteil */
#define IA_MAX        183040         /* Begrenzung I Anteil */
#define DA_MAX        183040         /* Begrenzung D Anteil */

/*****
Definition der Portausgänge der Relais
*****/
#define RELAI1 PF3                  /* Ausgang Schaltet Relay 1 EIN / AUS*/
#define RELAI2 PF2                  /* Ausgang Schaltet Relay 2 EIN / AUS*/
#define RELAI3 PF4                  /* Ausgang Schaltet Relay 3 EIN / AUS*/

typedef struct _stPID_Regler
{
    int e_k_minus_1;                /* Vorhergehende Reglerabweichung */
    long long p_anteil;              /* Proportionaler Anteil des D-Reglers
*/
    long long i_anteil;              /* Integraler Anteil des D-Reglers */
    long d_anteil;                  /* Differentialanteil */
    int abtastzeit;                  /* in welchen Zeitabständen der
Regler kontinuierlich aufgerufen wird ACHTUNG! Angabe in Q38.24*/
    int kp;                          /* Proportionalverstärkung */
    int ki;                          /* Integralverstärkung */
    int kd;                          /* Differentialverstärkung */
    int sollwert;                    /* Sollwert wird in anderer Funktion
hierher übergeben*/
    int istwert;                     /* Muss aus Struktur für d und Q
geholt werden.*/
    long long stellwert;             /* Ausgabewert des Reglers im
Eingabeformat*/
    int modus;                       /* 1=P, 2=PI, 3=PID */
} _stPID_Regler;

/* volatile int thetaSpannung; Drehzeiger der Netzspannung sollte von
jeder Funktion gelesen werden können*/

/*ClarkTransformation, Eingangssignal und Ausgabe in Alpha- Beta-
Koordinaten*/
typedef struct _stDatenInDreiAchsen
{
    int u_phas; /* Phase-U variable*/
    int v_phas; /* Phase-V variable*/
    int w_phas; /* Phase-W variable*/
} _stDatenInDreiAchsen;

typedef struct _stDatenInFesteAchsen
{
    int alpha; /* statische d-achsenvariable */
    int beta; /* statische q-achsenvariable */
    int gamma; /* Summe der 3 Phasen wenn Unsymmetrie */
    int theta; /* Drehwinkel des Koordinatensystems */

```

```

        } _stDatenInFesteAchsen;

typedef struct _stDatenInRotierendeAchsen
{
    int d_part;      /* statische d-achsenvariable */
    int q_part;      /* statische q-achsenvariable */
    int null; /* Summe der 3 Phasen wenn Unsymmetrie */
    int theta;      /* Winkel muss mit Übertragen werden für
die Rücktransformation */
    } _stDatenInRotierendeAchsen;
/*-----ENDE Strukturdefinition für die Funktion Clarktransformation*/


typedef struct _stSystemParameter
{
    int uebersetzungsverhaeltniss; /*Übersetzungsverhältnis des
Stelltransformators Format: Dezimal in % 000.*/
    int netzzeiger;                /*Spitzenwert der
Netzspannung 230V ist 325V */
    int trafozeiger;                /*Zeiger der
heruntertransformierten Netzspannung am Stelltrafo */
    int zwischenkreisspannung; /*Bezogen auf Wandler für Netz
(500V) als Integer Datenformat ist größer als 2^16 Bsp: 500V/(2^16-
1)*37365=570.16V*/
    int teststrom_RMS_U;
    int teststrom_RMS_V;
    int teststrom_RMS_W;
    int regler_alpha;              /*Gesamtteil der Stromregelung
inklusive Oberwellen*/
    int regler_beta;              /*Gesamtteil der Stromregelung
inklusive Oberwellen*/
    int rzm_alpha;                /*Eingabewert für die RZM*/
    int rzm_beta;                /*Eingabewert für die RZM*/
} _stSystemParameter;

```


Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 31. März 2013

Nick Meyer